



Aalto-yliopisto
insinööritieteiden korkeakoulu

Niklas Nevalainen

Lämpökamera päällystystöiden laadunvarmistuksessa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 11.8.2014

Valvoja: Professori Terhi Pellinen

Ohjaajat: Professori Terhi Pellinen, DI Katri Eskola

AALTO-YLIOPISTO TEKNIKAN KORKEAKOULUT PL 12100, 00076 Aalto http://www.aalto.fi		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Niklas Nevalainen			
Työn nimi: Lämpökamera päällystystöiden laadunvarmistuksessa			
Korkeakoulu: Insinööritieteiden korkeakoulu			
Laitos: Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka			
Professuuri: Tietekniikka		Koodi: Yhd-10	
Työn valvoja: Professori Terhi Pellinen, Aalto-yliopisto			
Työn ohjaaja(t): Professori Terhi Pellinen, DI Katri Eskola, Liikennevirasto			
<p>Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, kuinka hyvin lämpökamera soveltuu käytettäväksi tasalaatuisuuden varmistamisessa sekä kuinka vaatimus lämpökameran käytöstä päällystysurakoissa tulisi asettaa. Laatuvaatimusten lisäksi työn tavoitteena oli selvittää, millaisia hyötyjä tilaaja sekä urakoitsija voisivat saada lämpökameraa hyödyntämällä.</p> <p>Tutkimus koostui kahdesta osasta: kirjallisuustutkimuksesta ja kenttätutkimuksesta. Kirjallisuususiosiossa tehtiin katsaus aikaisempiin ulkomaalaisiin ja kotimaisiin tutkimuksiin aiheesta. Kenttätutkimuksessa seurattiin lämpökameran käyttöä kolmella kesän 2013 koekohteella. Lämpötila-aineiston lisäksi koekohteilta otettiin poranäytteitä valmiista päällysteestä. Poranäytteiden avulla selvitettiin päällysteen ominaisuuksia, kuten kappaleitiheys, massan maksimitiheys, päällysteen tyhjättila, sideainepitoisuus sekä rakeisuus. Lisäksi tutkittiin päällysteen lujuusominaisuuksia. Koekohteiden päällystetyyppinä käytettiin kivimastiksiasfalttia eli SMA -päällystettä.</p> <p>Lämpökameran tallentaman lämpötila-aineiston ja poranäytteistä määritettyjen parametrien avulla pyrittiin tarkastelemaan lämpötilan vaikutusta päällysteen ominaisuuksiin. Mittausten ja näytteenoton lisäksi urakoitsijoita haastateltiin lämpökameran käyttöön liittyvistä kokemuksista ja päällystyskohteilla vierailtiin seuraamassa lämpökameralaitteiston toimintaa.</p> <p>Tutkimustulosten perusteella havaittiin päällysteen pintalämpötilan ja päällysteen ominaisuuksien välillä yhteys. Lämpötilan laskiessa päällysteen tiivistäminen vaikeutuu ja valmiin päällysteen tyhjättila kasvaa. Kuormanvaihoissa havaittiin selvästi muuta päällystettä alhaisempia lämpötiloja sekä massalajittumia. Päällysteen kestävyys vaikuttaa lämpötilan lisäksi koko päällystysprosessi. Tiivistyksellä havaittiin olevan suuri merkitys tyhjättilojen suuruuteen.</p> <p>Työssä tarkasteltiin, miten vaatimus lämpökameran käytöstä tulisi asettaa. Koekohteilla käytettiin Roadscanners Oy:n laatimaa bonusmenettelyä, jonka perusteella urakoitsijoille maksettiin hyvästä työsuorituksesta. Työn perusteella ehdotetaan bonusmenettelyn muuttamista sekä koekohteiden kunnonseurantaa. Lisäksi työn havaintojen pohjalta ehdotetaan lämpökameratutkimuksen jatkamista.</p>			
Päivämäärä: 11.8.2014		Kieli: Suomi	
		Sivumäärä: 79 s. + liitteet 14 s.	
Avainsanat: Lämpökamera, päällystystyö, SMA, poranäyte			

AALTO UNIVERSITY SCHOOLS OF TECHNOLOGY PO Box 12100, FI-00076 AALTO http://www.aalto.fi		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Niklas Nevalainen			
Title: The use of thermal camera for quality assurance of asphalt pavement construction			
School: School of Engineering			
Department: Transportation and Environmental Engineering			
Professorship: Transportation and Highway Engineering		Code: Yhd-10	
Supervisor: Professor Terhi Pellinen, Aalto University			
Instructor(s): Professor Terhi Pellinen, DI Katri Eskola, The Finnish Transport Agency			
<p>The goal of this study was to determine how well a thermal camera is suited to the assurance of pavement uniformity and how the requirements for using thermal camera in asphalt paving contracts should be defined. In addition to quality requirements, the goal was to determine the benefits that could be achieved from the use of a thermal camera from the perspectives of both the contractor and the client.</p> <p>The study comprised two parts: literature research and field research. The literature research involved a survey of the previous Finnish and foreign research on the use of a thermal camera during paving operations. The field research examined the data produced by the thermal camera at three test sites during the summer of 2013. In addition to thermal camera, core samples were taken from the finished pavement at all three test sites. Core samples were analyzed to determine pavement properties such as bulk density, the maximum density of the asphalt mass, void content, binder content and gradation. Additionally, the strength properties of the pavement were examined. The pavement type used at all test sites was stone mastic asphalt, SMA.</p> <p>Data produced by the thermal camera and core samples taken from the finished pavement were analyzed in order to study the effect of the temperature on the characteristics of the pavement. In addition to measurements and sampling, contractors were interviewed for the experiences of using a thermal camera during paving operations. The sites were visited during paving to observe operation of the thermal camera system.</p> <p>Based on the results, connection between pavement temperature and the characteristics of the pavement was observed. As the temperature decreased pavement requires more effort to be compacted and the air void content of the finished pavement increases. At the truck end loads temperature found to be significantly lower and segregation was identified. In addition to temperature, the entire paving process has important effect to the durability of the pavement. The research also showed that compaction has a significant effect on air void content.</p> <p>The research also examined how the requirement on the use of a thermal camera should be defined. A bonus calculation system prepared by Roadscanners Oy was used at all three paving contracts. Contractors were paid a bonus for good performance. Based on the research, this study proposes modifying the bonus system and recommends follow-up examinations of the test sites during the coming years. This study also recommends continuing a thermal camera research.</p>			
Date: 11.8.2014		Language: English	
		Number of pages: 79 + 14	
Keywords: Thermal camera, asphalt paving, SMA, core sample			

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Liikennevirastossa kunnossapidon kehittämissyksikössä yhteistyössä Aalto-yliopiston kanssa.

Työn valvojana toimi Professori Terhi Pellinen Aalto-yliopistosta ja ohjaaja diplomi-insinööri Katri Eskola Liikennevirastosta. Lisäksi ohjausryhmään kuuluivat TkT Jarkko Valtonen ja TkT Niina Raitanen Aalto-yliopistosta.

Aluksi haluan kiittää työn teettäjää mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta. Suuri kiitos kaikille työn tekemiseen osallistuneille tahoille. Kiitos myös kaikille työmailla toimineille urakoitsijoille ja työntekijöille sekä näytteidenottajille. Kiitos Roadscanners Oy:n Juuso Pääkölle ja Timo Saarenkedolle lämpökameramittauksista.

Erityiskiitos Professori Terhi Pelliselle, diplomi-insinööri Katri Eskolalle, TkT Jarkko Valtoselle sekä Aalto-yliopiston tietekniikan tutkimusryhmälle. Kiitokset myös perheeleni ja ystävilleni tukemisesta ja kannustamisesta opinnoissani.

Espoo 11.8.2014

Niklas Nevalainen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Lyhenteet ja käsitteet.....	7
1 Johdanto	8
1.1 Tausta	8
1.2 Tutkimusongelma	8
1.3 Tavoitteet	9
1.4 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne	9
1.5 Tutkimuksen rajaus	9
2 Kirjallisuusselvitys	10
2.1 Päällysteen laatuun vaikuttavat tekijät	10
2.1.1 Yleistä	10
2.1.2 Lämpötila	11
2.1.3 Tasalaatuisuus	14
2.1.4 Tiivistäminen	16
2.2 Lämpökameran menetelmäkuvaus	17
2.3 Ulkomaiset tutkimukset.....	18
2.4 Kotimaiset tutkimukset.....	27
3 Tutkimuskohteet.....	32
3.1 VT1 - Salo	32
3.2 VT3 - Tampereen läntinen kehätie	33
3.3 VT4 - Kempele	34
4 Tutkimusmenetelmät.....	35
4.1 Kenttätutkimus	35
4.1.1 Lämpökameramittaukset.....	35
4.1.2 Näytteenotto	39
4.1.3 Palvelutasomittaukset.....	41
4.1.4 Haastattelututkimus.....	42
4.2 Laboratoriotutkimukset	42
4.2.1 Kappaletiheiden määrittäminen.....	42
4.2.2 Massan maksimitiheiden määrittäminen	43
4.2.3 Tyhjätilan määrittäminen	44
4.2.4 Sideainepitoisuuden määrittäminen	44
4.2.5 Rakeisuuden määrittäminen	45
4.2.6 Halkaisuvetolujuus	45
4.2.7 Jäykkyys	45
5 Tutkimustulokset.....	46
5.1 Lämpökameratulokset	46
5.2 Laboratoriotulokset	49
5.3 PTM -mittaustulokset	52
5.4 Haastattelututkimuksen tulokset.....	53
6 Tutkimustulosten tarkastelu	54
6.1 VT1 - Salo	55
6.2 VT3 - Tampereen läntinen kehätie	60
6.3 VT4 - Kempele	66
7 Yhteenveto, päätelmät ja suositukset	72

7.1	Lämpökamera.....	72
7.2	Jatkotutkimustarve.....	73
7.3	Suositukset.....	74
	Lähdeluettelo.....	77
	Liiteluettelo	80
	Liitteet	

Lyhenteet ja käsitteet

AB	Asfalttibetoni; päällystetyyppi
ASTO	Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma
ELY -keskus	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus
GPS	Global Positioning System; satelliittipaikannusjärjestelmä
IRI	International Roughness Index; kansainvälinen tasaisuusindeksi
MPD	Mean Profile Depth; Profiilin keskisyvyys
PTM	Palvelutasomittaus
RMS	Root Mean Square; profiilin tehollinen syvyys
SMA	Kivimastiksiasfaltti; päällystetyyppi

1 Johdanto

1.1 Tausta

Jo 1980-luvulla huomattiin kuumapäälysteiden lajittumisen olevan merkittävä ongelma päälysteen kestoiän kannalta. Ensimmäisen kerran lajittuminen tiedostettiin vuonna 1967 Yhdysvalloissa, mutta lajittumisen tarkempi tutkiminen käynnistyi vasta vuonna 1986, jolloin havaittiin kyseessä olevan yleinen ja laaja-alainen ongelma. Lajittumisen syitä sekä aiheuttajia on tutkittu yli 30 vuoden ajan. (Willoughby ym. 2001).

Vuosien saatossa päälystetutkimuksen suunta muuttui kohti materiaalia rikkomattomia tutkimusmenetelmiä. Nopea teknologian kehitys on antanut hyvät lähtökohdat tutkimusmenetelmien kehittämiseksi. Suomessa tutkittiin lämpökameran soveltuvuutta asfalttimassan ja -päälysteen lajittumisen kartoitukseen ensimmäisen kerran vuonna 1989 osana asfalttipäälysteiden tutkimusohjelmaa (Laitinen 1990). Yhdysvalloissa lämpökamerateknologiaan perustuva tutkimus puolestaan alkoi 1990-luvun alkupuolella ja laajeni 1990-luvun lopulla useiden osavaltioiden laajuiseksi tutkimukseksi (Willoughby ym. 2001). Lämpökameran soveltuvuutta lajittumisen kartoitukseen on tutkittu myös useissa Euroopan maissa, muun muassa Ruotsissa, Saksassa, Hollannissa sekä Kroatiasa.

Suomessa lämpökameran käyttöä päälystystöissä testattiin Liikenneviraston toimesta vuosina 2011 ja 2012. Kokeilut osoittivat menetelmän olevan toimiva, mutta vaativan lisää tutkimusta, sillä tuolloin kokeilut olivat lyhyitä ja keskittyivät pääasiassa mittauslaitteiston kehittämiseen. Näiden kokeilujen pohjalta suunniteltiin tämän diplomityön toteutus.

1.2 Tutkimusongelma

Päälystystyön onnistuminen on monen asian summa. Asfalttimiehet ovat perinteisesti olleet alalla pitkään ja työ nojaa suuresti tekijöidensä kokemukseen. Työmenetelmät ovat pitkään olleet samankaltaisia, vaikka uusia teknologioita on viime vuosina tullut yhä enemmän markkinoilla. Uusien teknologioiden ja työmenetelmien käyttöönotto on kuitenkin hidasta ja investoinnit yleensä suuria.

Nykyisin käytössä olevia ainetta rikkovia menetelmiä käytetään muun muassa valmiin päälysteen tyhjätilan sekä rakeisuuden määrittämiseen. Menetelmiin liittyy aina epävarmuustekijöitä, kuten otoksen edustavuus. Ne ovat myös sekä työläitä että aikaa vaativia toteuttaa.

Joissakin maissa, kuten Ruotsissa, on käytössä päälysteen pinnan lämpötilaeroihin perustuva menetelmä, jossa päälysteen tasalaatuisuutta mitataan lämpökameran avulla. Lämpökameran antaman aineiston perusteella pystytään erottamaan lajittumat valmiista päälysteestä sekä tarkastelemaan päälysteen lämpötilaa tiivistettävyyden kannalta.

Koska nykyisin Suomessa käytetty silmämääräinen tarkastelu ei anna luotettavaa tietoa päälysteen tasalaatuisuudesta, tällä työllä pyritään selvittämään lämpökameran soveltuvuutta laadunvarmistuksen menetelmäksi päälysteen tasalaatuisuutta tarkasteltaessa.

1.3 Tavoitteet

Työn tavoitteena on selvittää kuinka hyvin lämpökamera soveltuu käytettäväksi tasalaatuisuuden varmistamisessa sekä kuinka vaatimus lämpökameran käytöstä päällystysurakoissa tulisi asettaa. Työssä tarkastellaan myös kuinka päällysteiden tasalaatuisuutta voitaisiin parantaa lämpökameraa hyväksi käyttäen.

Laatuvaatimusten lisäksi työn tavoitteena on selvittää millaisia hyötyjä urakoitsijat voisivat saada hyödyntämällä lämpökameraa omassa työssään. Tavoitteena on myös tutkia voidaanko valmiista päällysteestä saada uutta tietoa lämpökameran avulla.

Työssä tarkastellaan myös mahdollisuuksia korvata lämpökameran käytöllä nykyisiä laadunvarmistuksessa käytettyjä menetelmiä ja täten uudistaa laajemmin koko laadunvarmistusmenettelyä.

1.4 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne

Tutkimuksen teoriaosassa tehtiin kirjallisuustutkimus lämpökameran käytöstä ulkomaille, käytetystä tekniikasta sekä aiemmin tehdyistä tutkimuksista. Kirjallisuutena käytettiin ulkomaisia julkaisuja aiheesta sekä aikaisempien vuosien tutkimustuloksia Suomessa tehdyistä tutkimuksista.

Työn kokeellisessa osiossa käsitellään lämpökameran tuottamaa aineiston kolmelta kesän 2013 koekohteelta sekä selvitetään kokemuksia lämpökameran käytöstä näillä kohteilla. Koekohteilta otettiin lisäksi poranäytteitä laboratoriotutkimuksia varten, jotta voitiin tutkia tarkemmin levityslämpötilan vaikutusta päällysteen ominaisuuksiin.

1.5 Tutkimuksen rajaus

Työssä tutkittavat päällystyskohteet ovat kaikki päällystetyypiltään kivimastiksiasfalttia eli SMA -päällystettä, joten työn tulokset eivät välttämättä anna riittävää tietoa lämpökameran soveltumisesta muille päällystetyypeille. Työn tuloksena syntyvä ehdotus lämpökameran käytöstä laadunvarmistuksen menetelmänä perustuu vain SMA -päällysteistä saatuun kokemukseen. Soveltuvuus AB -päällysteille on suositeltavaa tarkastella vielä erikseen.

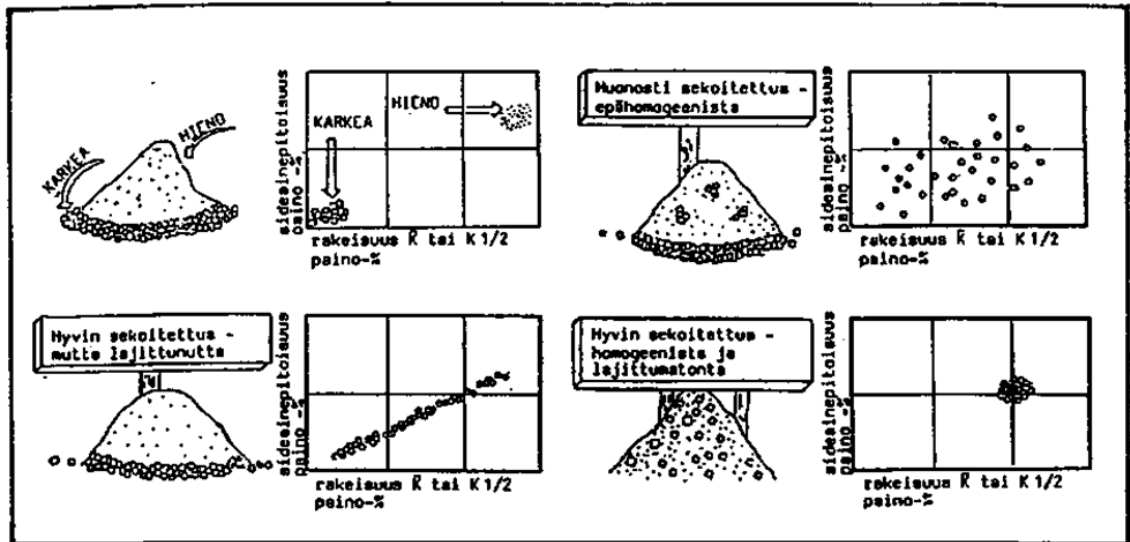
2 Kirjallisuusselvitys

2.1 Päällysteen laatuun vaikuttavat tekijät

2.1.1 Yleistä

Tiepäällysteiltä edellytetään tasaisuutta, kestävyyttä ja hyvää kitkaa, jotta päällyste tarjoaisi hyvät edellytykset turvalliselle ja vaivattomalle liikkumiselle. Päällysteen kestävyteen ja kesto-ikään vaikuttavia tekijöitä ovat mm. liikennemäärä, sääolosuhteet, päällysteen koostumus, raaka-aineet sekä päällysteen valmistus- ja levitysprosessi. Päällysteen tasaisuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat puolestaan asfalttimassan levityksen sekä tiivistyksen onnistuminen. (Hyypä 2000.)

Valmistusprosessilla, kalustolla ja työmenetelmillä on suuri vaikutus päällystystyön onnistumisessa. Oikeanlaisella kalustolla ja työmenetelmillä voidaan varmistaa asfalttimassan oikea lämpötila sekä lajittumattomuus ja homogeenisuus. Asfalttimassan lajittumisella tarkoitetaan rakeisuuden ja sideainepitoisuuden poikkeamista normaaliarvoista päällysteen eri osissa. Asfalttimassan lajittuminen ja epähomogeenisuus on määritelty seuraavasti: *"Lajittunut massa on alun perin hyvin sekoitettua homogeenista massaa, missä karkeat ja hienot kiviainesrakeet ovat erottuneet toisistaan sopimattoman käsittelyn seurauksena. Massan sideainepitoisuuden ja rakeisuuden välillä on lineaarinen yhteys. Epähomogeeninen massa puolestaan on huonosti sekoitettua, jolloin sideainepitoisuuden ja rakeisuuden välillä ei ole lineaarista yhteyttä. Epähomogeenisessa massassa kiviainesrakeiden sitoma sideainemäärä vaihtelee. Vaihtelu aiheutuu joko kiviaineksen rakeisuuden ja/tai sideainemäärän vaihtelusta sekoittajassa tai massan huonosta sekoituksesta."* (Pellinen 1985.) Ohessa on esitetty lajittumisen ja epähomogeenisen massan vaikutus rakeisuuteen ja sideainepitoisuuteen (kuva 1).

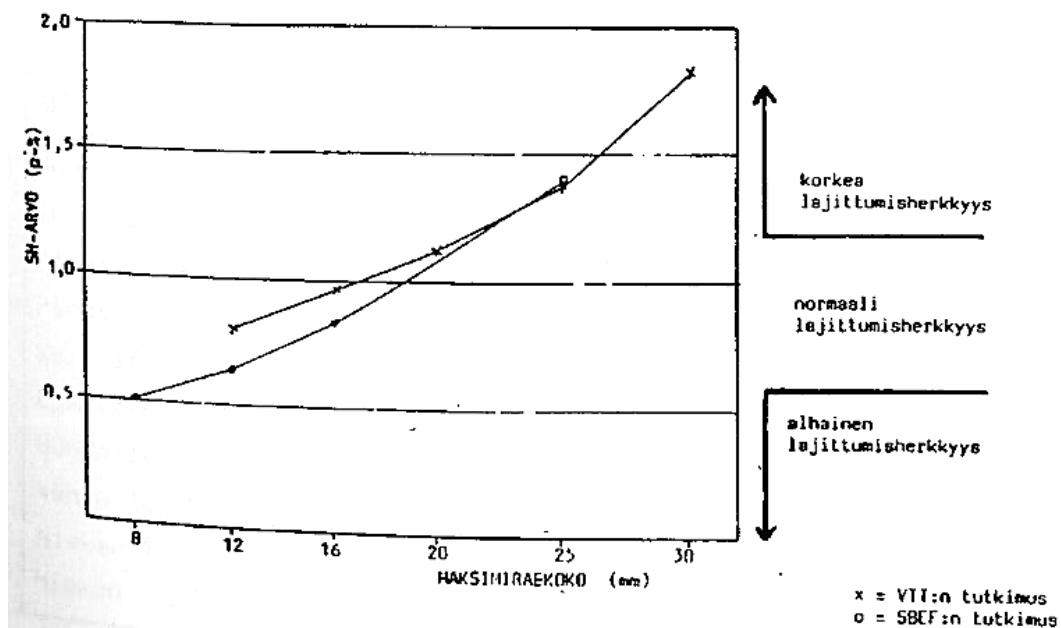


Kuva 1. Lajittuneen ja epähomogeenisen massan vaikutus sideainepitoisuuden ja rakeisuuden väliin yhteyteen (Pellinen 1985).

Lajittuminen voi olla joko satunnaista tai systemaattista. Satunnainen lajittuminen ilmenee päällysteessä epäsäännöllisinä normaalia enemmän sideainetta sisältävinä tai avoimina ja karkearakeisina kohtina. Systemaattinen lajittuma voi olla levittimen kierukoiden tai levityspalkin aiheuttamaa poikittaissuuntaista systemaattista lajittumaa, jolloin päällysteessä havaitaan karkearakeinen ja vähän sideainetta sisältävä jatkuva juova.

Kuormakatkosten kohdalla esiintyvää systemaattista pitkittäissuuntaista lajittumaa kutsutaan kuormalajittumaksi. (Hyyppä 2000.)

Asfalttimassan lajittumisherkkyys vaihtelee massan maksimiraekoon mukaan. Suomessa ja Ruotsissa tehdyissä tutkimuksissa on havaittu massan lajittumisherkyyden kasvavan maksimiraekoon kasvaessa. Esimerkiksi tutkimuksissa on havaittu AB 25 massan olevan noin 25 % herkempi lajittumiselle kuin AB 20 massan. Kuvassa 2 on esitetty AB-massojen maksimiraekoon vaikutus lajittumisherkyyteen. (Pellinen 1985.)



Kuva 2. Massan maksimiraekoon vaikutus lajittumisherkyyteen (Pellinen 1985).

2.1.2 Lämpötila

Lämpötilalla on olennainen vaikutus päällysteen laatuun ja kestoikään. Lämpötilalla on välitön vaikutus massan työstettävyyteen, tiivistykseen ja lajittumiseen sekä siksi myös välillisesti vaikutusta päällysteen urautumiseen ja vaurioitumiseen. (Vasama 2007.)

Asfalttimassalle on määritetty Asfalttinormeissa yleiset sekoituslämpötilavaatimukset asfalttiasemalla ja massan vähimmäislämpötila levityskohteessa kuorma-auton lavalta mitattuna. Asfalttinormien mukaan kuorma-auton lavalta ja massan sisältä mitattu lämpötila saa alittaa sekoituslämpötilan mukaisen alarajan enintään 10 °C. (Asfalttinormit 2011.) Oheisessa taulukossa (taulukko 1) on esitetty Asfalttinormeissa 2011 määritetyt massan lämpötilarajat asfalttiasemalla. Asfalttinormien lämpötilavaatimuksia sovelletaan Liikenneviraston ja ELY -keskusten teettämässä töissä.

Taulukko 1. Asfalttinormeissa 2011 määritetyt massan lämpötilarajat asfalttiasemalla.

Bitumin luokka	Lämpötila °C *)
KB	170–200
35/50	160–200
50/70	150–190
70/100	140–180
100/150, 160/220	130–170
250/330, 330/430	120–160
500/650	110–150
650/900	110–140
V 3000	50–120
V 1500	40–120

Massan lämpötilan on havaittu tutkimuksissa säilyvän korkeampana kuljetuksen aikana, kun kuorma on peitetty. Esimerkiksi 80 km/h nopeudessa ajoviiman vaikutus ilman kuormapeitettä + 10 °C lämpötilassa on huomattava, sillä tilanne vastaa - 4 °C lämpötilaa, jos auto seisoi paikallaan. Kuorman jäähtyessä auton lavalla kuorman pintaan muodostuu muuta massaa kylmempi kuori. Lisäksi massa jäähtyy lavan reunoilla keskustaa nopeammin. Koska jäähtyessään massan työstettävyyttä heikkenee, kylmempi kuori ei sekoitu massaan tasaisesti ja näin asfaltinlevittimelle menevän massan lämpötilajakaumasta tulee epähomogeeninen. (Vasama 2007.)

Valtioneuvoston asetus 846/2012 asfalttiasemien ympäristönsuojeluvaatimuksista edellyttää, että kaikki asfalttimassakuormat on peitettävä välittömästi lastauksen jälkeen kuljetuksen ajaksi hajun leviämisen estämiseksi (Finlex 2012). Kuorman peittämisellä on hajuhaittojen estämisen lisäksi positiivinen vaikutus asfalttimassan laadunvarmistamiseen.

Kuorman peittämisen lisäksi markkinoille on tullut lämpöeristettyjä lavoja, joissa lavan laidoilla oleva massa ei pääse jäähtymään eristettyjen laitojen ansiosta. Kuvassa 3 on esitetty saksalaisen Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH:n kehittänyt lämpöeristetty lava, jossa asfalttimassa työnnetään lavalta levittimeen. Lavan etuna on, että kuormapeitettä ei tarvitse poistaa tyhjennyksen ajaksi eikä lavaa tarvitse nostaa, jolloin tyhjennys onnistuu myös matalien siltojen alla. (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH 2013.)

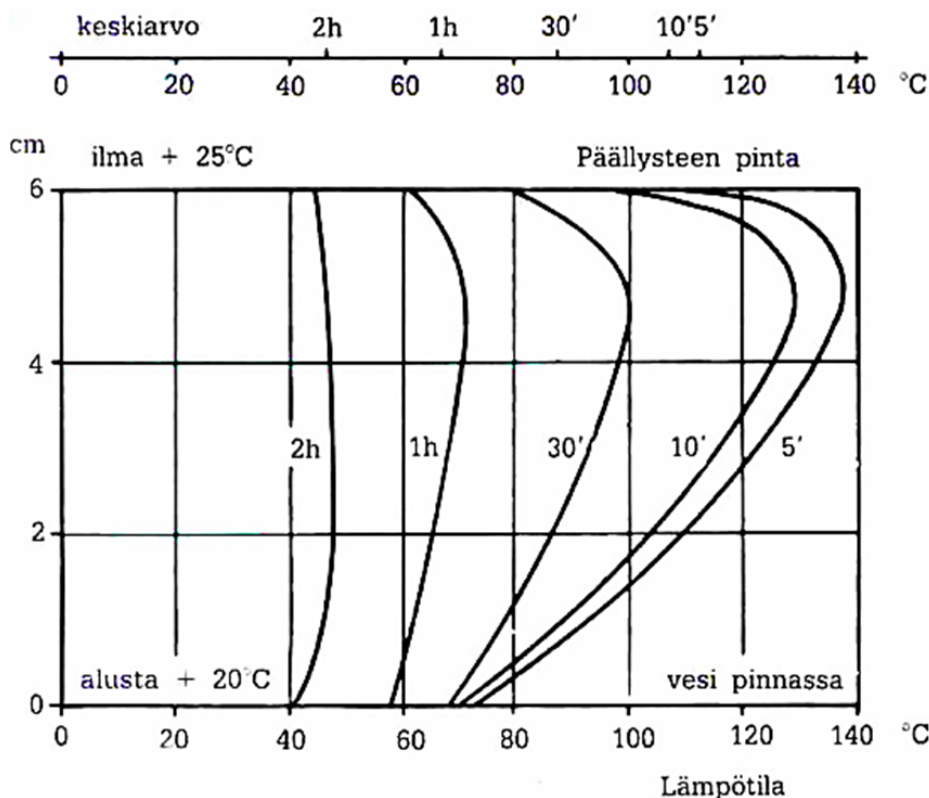


Kuva 3. Lämpöeristetty lava (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH 2013).

Lämpötilan merkitys korostuu erityisesti tiivistämisessä, sillä tiivistäminen onnistuu parhaiten vain melko kapealla lämpötila-alueella. Jokaisella asfalttimassalla on lämpötila-alue, jossa tiivistyminen on optimaalista, koska sideaineen viskositeetti muuttuu lämpötilan mukaan. Päällysteen lämpötilan laskiessa liian alhaiseksi massa muuttuu liian jäykäksi tiivistämisen kannalta. Toisaalta massan ollessa liian kuumaa päällysteestä on vaikea saada tasaista. Ilman ja pohjamaan lämpötila sekä sääolot, kuten tuulen nopeus ja ilmankosteus, vaikuttavat asfalttimassan jäähtymiseen. Massa jäähtyy sitä nopeammin mitä tuulisempi ja kylmempi ilma on. Tuulen vaikutus jäähtymisnopeuteen on suurempi kuin ilman lämpötilan. Taulukossa 2 on esitetty ilman lämpötilan sekä tuulen nopeuden vaikutus päällysteen jäähtymisnopeuteen. Kuvasta 4 on havaittavissa pohjamaan vaikutus päällysteen jäähtymiseen. Pohjamaa johtaa lämpöä tehokkaasti, joten päällyste jäähtyy alapuolelta huomattavasti nopeammin kuin pinnasta. (Vasama 2007, ASKO 2006.)

Taulukko 2. Ilman lämpötilan ja tuulen nopeuden vaikutus päällysteen jäähtymisnopeuteen (ASKO 2006).

Lämpötila °C	Tuulen nopeus m/s	Jäähtymisaika (155 °C - 75 °C) min		
		Kerrospaksuus (kg/m ²)		
		50	80	100
5	0	7,5	18	28
5	10	5	12	19
15	0	8,5	20	30
15	10	6	14	21
25	0	9,5	23	34
25	10	6,5	15	22



Kuva 4. Päällysteen lämpötila ajan funktiona (Vasama 2007).

2.1.3 Tasalaatuisuus

Päällystystöiden tavoitteena on luoda tasalaatuinen, eli lajittumaton ja homogeeninen päällyste, sillä päällyste vaurioituu usein paikallisesti. Lajittuneet, muuta päällystettä harvemmat kohdat ovat alttiimpia vaurioille. Paikallisten vaurioiden korjaaminen synnyttää usein epätasaisen pinnan päällysteeseen. Korkealuokkaisilla, vilkkaasti liikennöidyillä väylillä päällysteen pinnan tulee olla tasainen, joten paikalliset vauriot voivat johtaa koko päällysteen uusimiseen, vaikka suurin osa päällysteestä olisi kunnossa. (Vasama 2007.)

Jotta varmistetaan päällystystyön onnistuminen, on kuljetuskaluston vastattava koko ketjun suoritustehoa ja varmistettava keskeytymätön levitys riittävällä kuljetuskaluston määrällä. Käytettävän kuljetuskaluston on sovittava asfalttimassan kuljetukseen ja oltava mitoitukseltaan levityskalustoon sopivaa. Kuljetukseen tulisi käyttää pyöreäpohjaisia tai luiskattuja lavoja. Lajittumista saattavat aiheuttaa lavassa olevat siirtolavakiskot, lavan sopimaton pituus tai liian suuri lavaylitys. Lavan tulee nousta riittävän pystyyn asentoon, jotta massa purkautuisi yhdellä kerralla levittimen syöttösuppilon. Lavaylityksen ollessa liian suuri ei lava nouse riittävän pystyyn, jolloin massa purkautuu hitaasti ja lajittuu. Massa saattaa lajittua jo kuormauksen aikana asfalttiasemalla, jos massan pudotuskorkeus asfalttiasemalta kuorma-auton lavalle on liian korkea. Lajittumisen ehkäisemiseksi pudotuskorkeuden tulisi olla alle 1,2 metriä. (ASKO 2013.) Liikennevirasto vaatii käytettävän kaikissa urakoissa kalustoa, joka todennetusti ei aiheuta lajittumista. Tällaista kalustoa ovat muun muassa pyöreäpohjaiset lavat. Kuormapeitteiden käyttö ehkäisee tehokkaasti lämpötilaerojen syntymistä.

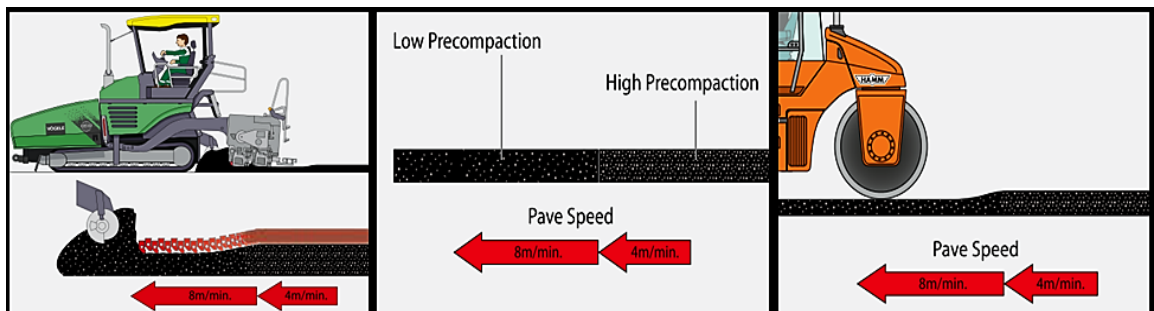
Tasalaatuisuutta voidaan myös parantaa käyttämällä niin kutsuttua massakuljetinta (kuva 5). Massa kipataan kuorma-auton lavalta levittimen edelle sijoitettuun massakuljet-

timeen, joka sekoittaa massan tasalaatuisuuden varmistamiseksi ja syöttää sen levittimelle jatkuvana virtana. Käytettäessä massakuljetinta levitin voi kulkea tasaisella nopeudella ja kuorma-autojen purkamiseen saadaan lisää joustavuutta. Markkinoilla on erityyppisiä massakuljettimia: varastoivia ja varastoimattomia, tela- ja pyöräalustaisia, autosta tai kasasta kuormaavia, sekoittavia ja vain kuljettavia. Näille kaikille on kuitenkin yhteistä massan kuljetus levittimelle. Sekoituksen ansiosta kuljetuksessa syntyviä lämpötilaeroja pystytään tasoittamaan sekä lajittumia vähentämään. (Vasama 2007.)



Kuva 5. Massakuljetin (Roadtec inc. 2014).

Päällysteen tasalaatuisuuteen vaikuttavat suuresti myös levitystekniikka ja yleisesti levitystyön onnistuminen. Levittimen säädöillä on suuri merkitys päällysteen paksuuteen ja tasalaatuisuuteen. Levittimen suppilossa sekä kierukassa tulee olla aina riittävästi massaa lajittumien ehkäisemiseksi. Levittimen tulisi ajaa tasaista nopeutta ja välttää liian suurta nopeutta sekä pysähdyksiä. Liian suuri nopeus voi aiheuttaa päällysteeseen halkeilua, joko näkyvää tai näkymätöntä. Pysähdyksissä massa puolestaan voi jäähtyä huomattavasti, eikä enää tiivisty kunnolla. Levittimen nopeuden suuri vaihtelu puolestaan altistaa päällysteen paksuuden muutoksille tai esitiivistysasteen muutoksille, jos levittimen säätöjä ei muuteta nopeuden muuttuessa. Kuvassa 6 on esitetty nopeuden muutoksen vaikutuksia päällysteeseen. Nopeusvaihteluiden lisäksi tulisi välttää usein tapahtuvaa päällysteen paksuudenkorjausta, sillä muutokset säädöissä eivät tapahdu välittömästi, vaan levittimen tulee edetä jonkin matkaa ennen kuin päällysteen paksuus muuttuu. Lopputuloksen kannalta optimaalinen levitysnopeus on eri asfalttimassoilla noin 4-9 m/min. (ASKO 2013, Vögele 2012.)

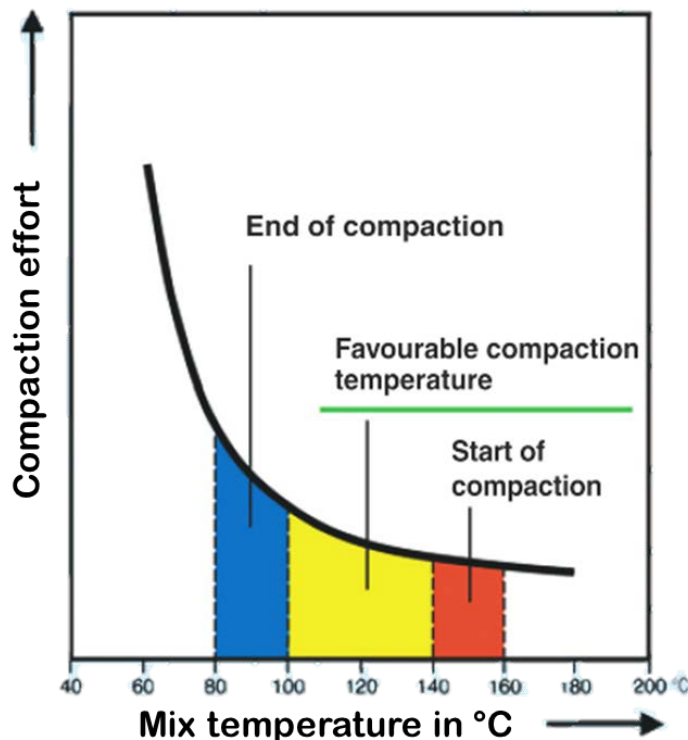


Kuva 6. Levitysnopeuden vaikutus päällysteeseen (Vögele 2012).

2.1.4 Tiivistäminen

Valmiin päällysteen tiiveyttä kuvataan päällysteen tyhjätilan avulla. Päällysteiden tiiveysvaatimukset on esitetty Asfalttinormeissa. Asfalttimassa tulee tiivistää välittömästi levityksen jälkeen. Tiivistys tapahtuu yleensä vähintään kahdella tai kolmella jyrällä massatyypin mukaan. Jotta saavutettaisiin asfalttimassan riittävä tiiveysaste, jokainen kohta päällysteestä on jyrättävä riittävällä määrällä ylityskertoja massan ollessa riittävän kuumaa. Ylityskertojen varmistamiseksi jyrät liikkuvat etukäteen suunniteltua reittiä, jota kutsutaan jyräyskaavioksi. (Vasama 2007.)

Tiivistystyöhön vaikuttavat olennaisesti massan koostumus sekä lämpötila. Korkealuokkaisilla teillä käytettävät massat on tyypillisesti valmistettu kovemmasta kivistä sekä jäykemmästä sideaineesta, jolloin riittävän tiiveyden saavuttamiseen vaadittavien jyräyskertojen määrä sekä kalusto poikkeavat massoista, joita käytetään alempiluokkaisilla teillä. Lisäksi rakeisuudella on merkitystä tiivistystyön toteuttamisessa. Karkearaakeinen massa vaatii voimakkaampaa jyräystä kuin hienompirakeinen massa. Lämpötilan vaikutusta päällysteen tiivistettävyyteen on havainnollistettu kuvassa 7. (Bomag 2009.)



Kuva 7. Päällysteen lämpötilan vaikutus tiivistämiseen (Bomag 2009).

Tiivistäminen tulisi aloittaa mahdollisimman aikaisin, sillä päällysteen lämpötilan laskeessa tiivistäminen vaikeutuu merkittävästi. Päällyste tiivistyy yleensä parhaiten 100–140 °C lämpötilassa. Tiivistys jaetaan tyypillisesti kolmeen vaiheeseen: esijyräykseen, tiivistysjyräykseen ja jälkijyräykseen. Esijyräys on aloitettava niin pian kuin mahdollista. Esijyräyksen tarkoituksena on tiivistyksen lisäksi hidastaa päällysteen jäähtymistä sulkemalla päällysteen pinta. Jyrien on työskenneltävä lähellä levitintä, sillä alussa massa jäähtyy nopeasti. Merkittävin osa tiivistyksestä tapahtuu tiivistysjyräyksessä. Riittävän tiiveysasteen saavuttaminen edellyttää, että päällyste on riittävän kuumaa. Vähintään kolme ensimmäistä tiivistyskertaa tulee suorittaa, kun massan lämpötila on yli 115 °C (bitumiluokka B70/100). Jos päällysteen lämpötila laskee alle 75 °C, tiivistysjyräys ei enää onnistu. Jälkijyräyksen tehtävänä on tiivistysjyräyksessä jääneiden jälkien pois-

taminen. Jälkijyräys on tehtävä massan lämpötilan ollessa yli 60 °C. (Bomag 2009, ASKO 2013.) Edellä esitetyt lämpötilat ovat vain suuntaa antavia, sillä tiivistyslämpötilat vaihtelevat massatyypeittäin.

Päällysteen riittävä tiiveysaste ja sitä kautta myös tyhjätila ovat tärkeitä ominaisuuksia päällysteen kestoian kannalta, sillä tyhjätilan kasvaessa päällysteen kestävyys heikenee. Toisaalta liian pieni tyhjätila voi johtaa sideaineen pintaan nousuun, jolloin päällysteen kitkaominaisuudet saattavat heikentyä. Lisäksi päällysteen deformaatoriski kasvaa, jos tyhjätilan pieneneminen johtuu korkeasta sideainepitoisuudesta. (Vasama 2007.)

2.2 Lämpökameran menetelmäkuvaus

Lämpökameran toiminta perustuu lämpösäteilyn eli sähkömagneettisen säteilyn mittaamiseen, jonka aallonpituus on infrapuna-alueella. Kaikki kohteet, joiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen, lähettävät lämpö- eli infrapunasäteilyä. Lämpökamera toimii lämpösäteilyn vastaanottimena, joka mittaa kuvattavan kohteen pinnasta luonnostaan lähtevää lämpösäteilyä. Lämpökamera muuttaa kohteen lämpösäteilyn lämpötilatiedoksi, josta lämpökuva muodostetaan digitaalisesti. (Infradex Oy 2013.)

Lämpökameralaitteisto koostuu vastaanottimesta, näytöstä, tietokoneesta, muistista sekä tarvittaessa myös paikannuslaitteistosta. Lämpökuva esitetään värien avulla siten, että yksi väri vastaa yhtä lämpötilaa. Yleensä sinisen sävyillä esitetään kylmemmät alueet ja punaisen sävyillä kuumemmat alueet. Lämpökameran resoluutio vaikuttaa mitattavan alueen kokoon sekä asennusetäisyyteen mitattavasta kohteesta. Esimerkiksi levittimen takaosaan katon rajaan asennetulla lämpökameralla voidaan mitata koko kaistan leveydeltä yhdellä mittauksella. Lämpökameran tarkkuus on parhaimmillaan jopa 0,02 astetta. Kuvassa 8 on esitetty levittimen perään asennettu lämpökamera. (Infradex Oy 2013, Meegoda ym. 2002.)



Kuva 8. Levittimen perään kiinnitetty lämpökamera (Nevalainen 2013).

Lämpökameran kuvasta on helposti havaittavissa lämpötilaerot, sillä kohteen pintalämpötila vaikuttaa voimakkaasti emittoituvan säteilyn aallonpituuksiin. Lämpökameran kuvasta voidaan havaita lämpötilajakaumat sekä pintatekstuurin muutokset, kuten mas-salajittumat. Lajittuneet kohdat näkyvät lämpötilamatossa kylmempinä kohtina, sillä

massalajittumisen seurauksena päällysteen pinta on avoimempi ja siten nämä kohdat myös jäähtyvät ympäröivää päällystettä nopeammin. (Vasama 2007.)

2.3 Ulkomaiset tutkimukset

Alhaisen tiivistyslämpötilan sekä massalajittumisen vaikutusta päällysteisiin on dokumentoitu Yhdysvalloissa jo yli 40 vuoden ajan. Ensimmäisen kerran lajittumista alettiin suuremmassa mittakaavassa tutkia 1980-luvulla, kun sen havaittiin olevan yleinen ongelma kuumasekoitteisissa massoissa. (Willoughby ym. 2001.)

Lajittuminen jaetaan kirjallisuudessa usein kahteen luokkaan, massalajittumaan ja lämpölajittumaan (Stroup-Gardiner & Brown 2000). Massaa voidaan pitää lajittuneena, kun rakeisuuskäyrä muuttuu normaaliarvoista joko liian paljon hienoainesta sisältäväksi tai liian karkeaksi. Jos massassa on liian paljon karkeaa kiviainesta, päällysteen pinnasta tulee avoin ja tyhjätila kasvaa. Tällöin myös tyypillisesti sideainepitoisuus on alhainen. Tämän kaltainen päällyste on altis vaurioille ja siksi lajittumia, joissa rakeisuuskäyrä on siirtynyt karkeaksi, pidetään haitallisina päällysteen kestoajan kannalta. Jos taas massa sisältää liikaa hienoainesta, on päällysteen sideainepitoisuus tyypillisesti normaalia korkeampi, tyhjätilat pieniä ja pinta tasainen. Tällöin päällyste on alttiimpi urautumiselle. (Willoughby ym. 2001.) Lämpölajittuma määritellään kirjallisuudessa päällysteeseen muodostuvina ympäröivää päällystettä kylmempinä kohtina, joissa yleensä valmiin päällysteen tiheys on alhaisempi ja tyhjätilat suuria. Yleisimpiä syitä kylmempien alueiden muodostumiselle ovat kuorma-auton lavalla massan pintaan syntyvä muuta massaa kylmempi kuori, lavan reunoilla nopeammin jäähtyvä massa sekä levittimen suppilon laiduille jäävä massa. Tämä kylmempi massa päättyy levittimestä päällysteeseen sekoittumatta kuumemman massan kanssa, jolloin kylmemmät kohdat jäävät valmiiseen pintaan. Myös massalajittumat, joissa rakeisuuskäyrä on liian karkea, voidaan havaita päällysteessä kylmempinä kohtia, sillä karkearakeisessa päällysteessä pinta on avoimempi ja näin myös jäähtyminen on nopeampaa. (Stroup-Gardiner & Brown 2000.)

Riittävän tiivistyksen saavuttamista kuumasekoitteisia massoja käytettäessä on tutkittu 1950-luvulta lähtien. Laboratoriokokeissa ja kenttämittauksissa on havaittu riittämättömän tiivistyksen johtavan liian suuriin tyhjätiloihin, mikä puolestaan alentaa päällysteen kestoikää. Tiivistyslämpötila vaikuttaa suoraan saavutettavaan tiiveyteen, kuten vuonna 1959 suoritettussa laboratoriokokeessa paljastui. (Willoughby ym. 2001.)

Vuonna 1995 Washingtonin osavaltiossa suoritettussa päällysteiden lajittumista kartoittavassa tutkimuksessa havaittiin lämpötilalla olevan yhteys lajittumiseen. Tutkimuksessa otettiin poranäytteitä kohdista, jotka näyttivät silmämääräisesti muuta päällystettä avonaisemmilta. Laboratoriotutkimuksessa ei kuitenkaan havaittu näillä kohdilla massalajittumaa. Tutkimuksen tuloksena todettiin kohtien olevan lämpölajittuneita. Nämä avonaisemmat alueet syntyivät kohtiin, joissa massan lämpötila oli selvästi ympäröivää päällystettä alhaisempi. Tutkimuksen seurauksena lämpötilaerojen vaikutusta päällysteen kestävyysasteeseen ja lajittumien syntyyn alettiin tutkia laaja-alaisesti. (Henault 1999.)

Yhdysvalloissa Washingtonin osavaltiossa suoritettiin vuosina 1998–2000 laajamittainen tutkimusohjelma, jossa tutkittiin lämpötilaerojen vaikutusta päällysteen ominaisuuksiin ja kestoikään. Tutkimus oli jatkoa vuonna 1995 tehdylle selvitykselle, jossa lämpötilaeroista aiheutuvat ongelmat havaittiin ensimmäisen kerran. (Willoughby ym. 2001.)

Vuoden 1998 tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, syntyykö päällysteeseen lajittumaa kohtiin, joissa havaitaan lämpötilaeroja. Päällysteen lämpötilojen mittaamisessa käytettiin apuna lämpökameraa, jolla kuvattiin päällysteen pintaa heti levittimen perän jälkeen. Lämpökameran lisäksi puikkomittarilla mitattiin päällysteen sisälämpötilaa, sillä lämpökameralla saadaan mitattua vain pintalämpötiloja. Päällysteen pinnan lämpötilat olivat hieman alhaisempia kuin päällysteen sisältä mitatut lämpötilat, mutta lämpötilaerot olivat samansuuruisia mittaussyvyydestä riippumatta. Tutkimuksessa oli mukana neljä päällystyskohdetta. Millään tutkitulla kohteella ei havaittu selvää massalajittumaa, vaikka jokaisella kohteella havaittiin selviä lämpötilaeroja. Lämpötilaerot päällysteen kylmimpien ja kuumimpien osien välillä vaihtelivat 7-39 °C (12-70 °F). Lämpötilaero oli keskimäärin 21 °C (38 °F). Vaikka selvää massalajittumaa ei havaittukaan, tyhjätiloissa oli suurta vaihtelua. Kylmemmillä alueilla tyhjätilat olivat 1,6-7,8 prosenttiyksikköä korkeammat kuin kuumimmilla alueilla. Keskimäärin tyhjätila oli 3,9 prosenttiyksikköä korkeampi kylmillä alueilla. Jyräksen havaittiin vaikuttavan tyhjätilaeroihin merkittävästi, sillä vaikka päällysteessä oli kylmiä kohtia, oikeaoppisella jyräksellä tyhjätilaero kuumen ja kylmän alueen välillä saatiin pidetty 2,8 prosenttiyksikköä, vaikka kyseisellä kohteella tavattiin suurimmat erot lämpötiloissa. Vastaavasti kohteella, jossa jyräys ei ollut kunnollista ja tapahtui liian myöhään levitystyön jälkeen, havaittiin suurimmat tyhjätilat, vaikka lämpötilaerot olivat pienimmät. Vuoden 1998 tutkimuksen lopputuloksena todettiin lämpökameran soveltuvan hyvin lämpötilaerojen karitoittamiseen. (Willoughby ym. 2001.)

Tutkimusta jatkettiin vuonna 1999 edellisvuoden havaintojen perusteella. Vuoden 1999 tavoitteena oli selvittää työmenetelmien ja työvälineiden vaikutusta lämpötilaerojen syntyyn. Tutkimuksessa vierailtiin 36 päällystyskohteella Washingtonin osavaltiossa. Lämpökameralla mitattiin päällysteen pintalämpötilaa levittimen jälkeen ennen tiivistystä kuten aikaisemmassakin tutkimuksessa. Lämpötilaerot kylmimpien kohtien ja päällysteen kuumimpien kohtien vaihtelivat 3-38 °C (5-69 °F) välillä. Yleisesti havaittiin, että mitä suurempi lämpötilaero oli, sitä suurempi tyhjätila päällysteeseen jäi. Lämpötilaeron ollessa alle 14 °C (25 °F) tyhjätila kasvoi keskimäärin alle 2 prosenttiyksikköä, kun taas yli 14 °C (25 °F) lämpötilaeroilla tyhjätila oli selvästi yli 2 prosenttiyksikköä keskiarvoa suurempi. Osassa kohteista käytettiin massakuljettimia, joilla asfalttissa sekoitettiin ennen levitintä. Kohteissa, joissa käytettiin massakuljetinta, lämpötilaerot olivat selvästi pienempiä. Roadtec Oy:n valmistaman massakuljettimen, Shuttle Buggy:n, havaittiin vähentävän lämpötilaeroja eniten. Lämpötilaero oli keskimäärin 6 °C (10 °F) kohteilla, joissa käytettiin Roadtec Oy:n valmistamaa Shuttle Buggya. Kohteissa, joissa tiivistykseen käytettiin tärjyriä, tyhjätila kasvoi vain 0,7 prosenttiyksikköä kun lämpötilaero oli yli 14 °C (25 °F). Vastaavasti kohteissa, joissa oli käytössä pelkästään valssijyriä, tyhjätila kasvoi keskimäärin 2,4 prosenttiyksikköä, kun lämpötilaero oli yli 14 °C (25 °F). Massan lämpötilalla asfalttiasemalla ja lämpötilaerojen välillä ei havaittu selvää korrelaatiota. Kuitenkin näyttäisi siltä, että mitä korkeampi massan lämpötila on asfalttiasemalla, kun se lastataan kuorma-auton lavalle, sitä suurempia lämpötilaeroja päällysteeseen syntyy. (Willoughby ym. 2001.)

Vuoden 2000 tutkimus keskittyi tarkastelemaan, miten lämpökameralla havaittuja lämpötilaeroja voitaisiin hyödyntää tiheysmittauksien mittaushohtia määritettäessä. Tutkimuksen tavoitteena oli yhdistää lämpökameran tarjoama informaatio Kansasin osavaltiossa käytettävään tiheydenmittaukseen. Tutkimuksessa vierailtiin 17 päällystyskohteella, jotka vaihtelivat päällystetyypin osalta. Osassa kohteista oli käytössä massakuljetin. Jopa 10 kohteella lämpötilaerot olivat alle 14 °C (25 °F), mikä selittyi osaksi massakuljettimien lisääntyneellä käytöllä sekä osaksi edellisten vuosien tutkimusten ansiosta

lisääntyneellä tietoisuudella lämpötilaerojen vaikutuksesta päällysteen ominaisuuksiin. Kohteilla, joissa lämpötilaerot olivat 14 °C (25 °F) tai suurempia, 89 % mittauksista ei täyttänyt tiheydelle asetettuja vaatimuksia. Vastaavasti lämpötilaeron ollessa alle 14 °C (25 °F), 80 % mittauksista täytti niille asetetut vaatimukset. Tutkimuksessa kävi ilmi, että alhaisemmilla lämpötiloilla tiheysvaihtelu kasvaa ja tiivistämiseen käytössä oleva aika pienenee. Vaikka vuoden 1999 tutkimuksissa havaittiin jyräyskaluston vaikuttavan tyhjätilaeroihin, vuoden 2000 tutkimuksessa ei havaittu jyräyskalustolla olevan merkittävää vaikutusta tiheysmittauksiin. Kuitenkin tyhjätiloja voitiin alentaa jyräämällä päällysteessä havaitut kylmemmät kohdat useammin. Vuoden 2000 mittauksissa havaittiin myös massakuljetimen käytön vähentävän lämpötilaerojen syntyä, muttei poistavan niitä kokonaan. Lisäksi tutkimuksessa korostettiin oikeiden työtapojen merkitystä päällystystöiden onnistumisen kannalta. Lämpötilaerojen havaittiin olevan hyvä tapa selvittää ne päällysteen kohdat, joissa mahdollisesti on massalajittumaa, sillä karkearakeiset kohdat ovat ympäröivää päällystettä avoimempia ja siksi jäähtyvät nopeammin. Lajittuminen lisäsi myös tiheyseroja. Tiheyserojen havaittiin tyypillisesti sijaitsevan systemaattisesti etenkin kuormanvaihtojen kohdalla, joten normaalisti käytetty sattumanvarainen näytteenotto ei tutkimuksen mukaan paljasta tiheysvaihteluita hyvin. Jos kuitenkin lämpötilaerojen avulla ei havaita lajittuneita kohtia, joudutaan tarkastelemaan päällysteen pintatekstuuria visuaalisesti. (Willoughby ym. 2001.)

Yhteenvedona vuosien 1998–2000 tutkimuksista todettiin kaikilla tutkituilla kohteilla esiintyvän merkittäviä lämpötilaeroja. Vuoden 1999 tutkimuksessa suurimmaksi syyksi lämpötilaeroille todettiin kuorma-auton lavalla kuljetuksen aikana muodostuva kylmempi kuori, joka havaitaan päällysteessä kylminä kohtina kuormanvaihtoissa. Kuljetusmatkan ja lämpötilaerojen määrän välillä ei havaittu kuitenkaan selvää korrelaatiota. Suuria lämpötilaeroja syntyi kuljetusmatkan ollessa jopa alle 5 minuuttia. Merkittäviä massalajittumia ei havaittu esiintyvän yhdelläkään tutkitulla päällystyskohteella, vaikka selviä lämpötilaeroja ja huomattavan kylmiä kohtia esiintyikin. Lämpötilaeron raja-arvoksi tutkimusten pohjalta määriteltiin 14 °C (25 °F). Tätä suuremmilla lämpötilaeroilla esiintyy suurella todennäköisyydellä lajittumia ja tyhjätilat kasvavat liian suuriksi päällysteen kestävyyskannalta. Tutkimuksissa korostui työmenetelmien ja kaluston oikeanlainen käyttö. Jyräyksellä ja massakuljettimien käytöllä voidaan vähentää kylmien alueiden syntymistä sekä näiden alueiden aiheuttamia vaikutuksia päällysteen kestoikään ainoastaan, jos kaluston käyttö on oikeanlaista. Lämpökameran käyttö yhdessä tiheysmittausten kanssa helpottaa paikallistamaan ongelmakohtia. Jos päällysteen tiheys on riittävä ja tyhjätilat alhaiset, päällyste todennäköisesti palvelee suunnitellun kestoajan ajan, vaikka päällysteessä esiintyisikin lämpötilaeroja. (Willoughby ym. 2001.)

Washingtonin osavaltiossa tehdyn kolmivuotisen tutkimuksen lisäksi vuonna 2000 Yhdysvalloissa suoritettiin tutkimus, jonka tavoitteena oli kehittää menetelmä lajittumisen määrittämiseen, havaitsemiseen sekä mittaamiseen. Tutkimuksessa pyrittiin myös selvittämään lajittumisen vaikutuksia päällysteen kestävyyskannalta. Tutkimukseen osallistui 14 päällystyskohdetta, joista seitsemässä päällystystyö oli jo päättynyt ja seitsemän kohdetta, joissa päällystystyö oli käynnissä. Tutkitun kaistan pituus oli 80–160 metriä kohteesta riippuen. Tutkimuksessa tarkasteltiin sekä ainetta rikkovien että ainetta rikkomattomien menetelmien käyttöä erityyppisen lajittumisen havaitsemiseen. Ainetta rikkomattomina menetelminä käytettiin lämpökameraan perustuvaa lämpötilaerojen mittausta, radioaktiiviseen säteilylähteeseen perustuvaa tiheysmittauslaitetta sekä lasersäteilyyn perustuvaa pinnan tekstuuria mittaavaa menetelmää. (Stroup-Gardiner & Brown 2000.)

Hiljattain valmistuneilla kohteilla suoritetuissa mittauksissa lämpökameralla tarkasteltaessa esiintyi joitakin eroja lämpötiloissa, mutta erot olivat selvästi pienempiä kuin päällystystyön yhteydessä havaitut lämpötilaerot. Lisäksi näissä kohteissa lämpötiloihin vaikuttivat voimakkaasti ympäröivän kasvillisuuden ja pilvien aiheuttamat varjot, jolloin mittaustulokset eivät olleet luotettavia. Lämpökameran hyödyntämistä lajittumien havaitsemiseen hiljattain valmistuneilta kohteilta ei pidetty toimivana menetelmänä, sillä lämpötiloihin vaikuttivat suuresti ulkoiset seikat. (Stroup-Gardiner & Brown 2000.)

Kohteilla, joissa päällysteen lämpötilaa mitattiin työn aikana heti levittimen jälkeen, havaittiin suuria lämpötilaeroja etenkin silloin, kun levitin pysähtyi. Lämpötilojen ja tyhjätilan välillä ei havaittu selvää korrelaatiota, mutta sen sijaan sideainepitoisuuden ja tyhjätilan välillä oli nähtävissä selvä korrelaatio. Kun sideainepitoisuus kasvoi, tyhjätila pieneni. Yhdellä kohteella tavattiin suuria lämpötilaeroja vaikka tällä kohteella olikin käytössä massakuljetin. Lämpötilaerot johtuivat kuljetusongelmista, sillä levittimen oli ajoittain pysähdyttävä odottamaan seuraavaa kuormaa. Jälleen kerran korostuivat oikeanlaisten työtapojen ja kunnollisen suunnittelun tärkeys lämpötilaerojen minimoimisessa. Laboratoriomittauksissa havaittiin selvä korrelaatio sideainepitoisuuden ja rakeisuuden välillä. Yhden kohteen alussa havaittiin massalajittumaa kohdissa, joissa lämpötila oli alhainen. Tutkimuksessa lämpölajittumisen havaittiin lisäävän urautumista, sillä näissä kohdissa tiheys on ympäröivää päällystettä pienempi. Massalajittumien kohdalla päällyste puolestaan purkaantuu nopeammin avoimen pintatekstuurin ja suuremman tyhjätilan vuoksi. (Stroup-Gardiner & Brown 2000.)

Tutkimuksessa tehtyjen laboratoriomittausten ja lämpötiladatan pohjalta lajittuminen jaettiin kolmeen eri luokkaan lämpötilaeron ja massan ominaisuuksien perusteella. Kuvassa 9 on esitetty raja-arvot eri lajittumisasteille. Tutkimuksen mukaan alueet, joissa lämpötila poikkeaa maksimiarvosta alle 16 °C, eivät ole päällysteen kestoian kannalta merkitseviä. Jos lämpötilaero on 17–21 °C, kylmemmät alueet tulisi tutkia tarkemmin lajittumisasteen määrittämiseksi ja mahdollisesti korjata. Lämpötilaeron ollessa yli 21 °C voidaan olettaa kyseisessä kohdassa esiintyvän selvää lajittumista, jolloin alue tulisi poistaa ja päällystää uudelleen. (Stroup-Gardiner & Brown 2000.) Täytyy kuitenkin huomata, että kyseiset raja-arvot on määritetty Yhdysvalloissa käytettäville kuuma-sekoitteisille massoille, eivätkä täten ole suoraan sovellettavissa Suomeen.

Mixture Property	Percent of Non-Segregated Mix Property by Level of Segregation			
	None	Low	Medium	High
Range of Temperature Differences, °C	<10	10 to 16	17 to 21	> 21
Surface Texture Ratios	< 1.16	1.16 to 1.56	1.57 to 2.09	> 2.09
Change in Mix Properties Expressed as a % of the Properties in the Non-Segregated Areas				
Permeability	Increased slightly	Increasing with level of coarse segregation		
Resilient Modulus ¹	Little or slightly increasing stiffness	70 to 90%	50 to 70% (infrared) 30 to 80% (laser)	< 50% (infrared) < 30% (laser)
Dynamic Modulus	Little or slightly increasing stiffness	80 to 90%	70 to 80%	50 to 70%
Dry Tensile Strength	110%	90 to 100%	50 to 80%	30 to 50%
Wet Tensile Strength	80 to 90%	75%	50%	30%
Low Temperature Tensile Stress	No conclusions due to test method difficulties			
Loss of Fatigue Life when Segregation in Upper Lifts, %	Not Estimated	38%	80%	99%
Rutting Potential	Not strongly influenced by gradation segregation until a high level of segregation is seen			
Difference in Values Between Segregated and Non-Segregated Areas				
Gradations Minimum number of sieve sizes that are given % coarser	NA	1 sieve > 5%	2 sieves > 10%	4 sieves > 15%
Change in Air Voids, %	NA	2.5 to 4.5% (infrared) 0 to 2.5% (laser)	4.5% to 6.5% (infrared) 0 to 2.5% (laser)	> 6.5% (infrared) > 4% (laser)
Change in Asphalt Content, %	NA	-0.3 to -0.75%	-0.75 to -1.3%	> 1.3%

¹Reflects results from testing both cores and laboratory-prepared samples

Kuva 9. Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa määritetyt raja-arvot eri lajittumisasteilla (Stroup-Gardiner & Brown 2000).

Yhteenvedona vuoden 2000 tutkimuksesta voidaan todeta lämpökameran olevan toimiva apuväline lajittumisen mittaamiseen. Lämpökameralla ei kuitenkaan pystytä erottamaan lämpölajittumaa ja massalajittumaa toisistaan. Lämpökameran avulla voidaan merkitä päällysteestä alueet, joissa lämpötilaero poikkeaa maksimiarvosta merkittävästi ja tutkia nämä kohdat poranäytteiden avulla tarkemmin lajittumisen suuruuden selvittämiseksi. (Stroup-Gardiner & Brown 2000.)

Connecticutin osavaltiossa tutkittiin lämpökameran käyttöä vuosina 2000–2003 tehdys- sä tutkimuksessa, johon osallistui 40 päällystyskohdetta. Kohteet vaihtelivat päällyste- tyypin ja kaluston osalta. Massankuljetin oli käytössä 11 kohteella, joista kahdeksan kuljetinta oli varustettu massansekoittimella. Kuljetusmatkalla ei havaittu olevan vaiku- tusta lämpötilaerojen suuruuteen, mutta kuljetusmatkan havaittiin vaikuttavan kylmien alueiden pinta-alaan. Massakuljettimen tyyppi vaikutti selvästi lämpötilaeroihin. Mas- sakuljetin, jossa ei ollut massan uudelleen sekoitusta, pienensi lämpötilaeroa keskimää- rin 8 °C (14 °F) verrattuna perinteiseen kuorma-autoon. Vastaavasti sekoittimella va- rustettu massakuljetin pienensi lämpötilaeroa keskimäärin 20 °C (36 °F). Kylmien alu- eiden havaittiin muodostuvan lähes yksinomaan kuormanvaihtojen sekä pysähdysten

kohdalle. Levittimen suppilon laitojen kääntämisellä havaittiin olevan vaikutusta kylmien alueiden suuruuteen. Tutkimuksen mukaan levittimen laitojen kääntäminen joka kuormanvaihdon yhteydessä ei vaikuttanut kylmien alueiden pinta-alaan, mutta jos laidat käännettiin harvoin, muodostui suurempia alueita aina silloin kun laidat käännettiin. Lisäksi laitojen kääntäminen tulisi tehdä silloin, kun levittimen suppilossa on massaa, jotta laitojen kylmempi massa sekoittuisi kuuman massan kanssa. (Mahoney ym. 2003.)

Kaikissa 2000-luvun alussa Yhdysvalloissa suoritetuissa tutkimuksissa lämpökamera-laitteistona käytettiin käsikäyttöistä kameraa, jolla ei ollut mahdollista kuvata päällysteen pintaa jatkuvana mittauksena. Texasin osavaltiossa alettiin vuonna 2002 kehittää laitteistoa, jolla lämpötilan mittaaminen olisi jatkuvaa ja automaattista. Lämpökameran sijasta päädyttiin kehittämään laitteisto, joka koostui useasta infrapunasensorista. Nämä sensorit asennettiin palkkiin noin metrin korkeudelle päällysteen pinnasta. Laitteisto oli pyörien varassa ja sitä työnnettiin levittimen perässä. Laitteistoa testattiin vuonna 2003 ja kehiteltiin kokemusten perusteella. Vuonna 2005 laitteisto päätettiin asentaa suoraan levittimen perään, jotta työskentely helpottuisi. Laitteistoa testattiin vuonna 2005 kolmella päällystyskohteella. Laitteistoon kuuluvan näytön avulla urakoitsijat pystyivät muuttamaan työskentelytapojaan työn edetessä ja näin vähentämään syntyviä lämpötila-eroja. Kuten edellisten vuosien tutkimuksissa, jälleen kerran havaittiin massakuljettimien vähentävän lämpötilaerojen syntymistä. (Sebesta ym. 2005, Scullion ym. 2005.)

Nykyisin muun muassa Texasin osavaltiossa käytössä oleva infrapunapalkki perustuu vuonna 2005 kehitettyyn versioon. Kuvassa 10 on esitetty nykyisin käytössä oleva laitteisto.



Kuva 10. Yhdysvalloissa käytössä oleva levittimeen asennettava infrapunapalkki päällysteen lämpötilan mittaamiseen (Scullion ym. 2005).

Texasin osavaltiossa on lämpötilan mittaamisesta tehty työselitys ja urakoista on lisäksi mahdollista saada bonusta, jos levityslämpötilaa seurataan. Texasissa päällysteen lämpötilaa voidaan mitata käsikäyttöisellä infrapunamittarilla, käsikäyttöisellä lämpökameralla tai levittimeen asennettavalla infrapunapalkilla, jossa on vähintään 10 infrapu-

nasensoria. Päälyste jaetaan osajaksoihin, joilta jokaiselta määritetään maksimi- ja minimilämpötila. Jos minimilämpötila on yli 14 °C (25 °F) maksimilämpötilaa alhaisempi, kyseiseltä jaksolta tulee tutkia kylmien alueiden tiheys silloin, kun mittaukset on suoritettu infrapunamittarilla tai lämpökameralla. Jos mitattu tiheys täyttää vaatimukset, maksetaan jaksolta bonusta. Jos lämpötilamittauksiin käytetään infrapunapalkkia, ei tiheysmittauksia vaadita, mutta työskentelytapoja tulee tarkastella, jotta lämpötila täyttäisi vaatimukset. Jos lämpötila on yli 28 °C (50 °F) kyseisen jakson maksimilämpötilaa alhaisempi, tulee päälyste kyseiseltä jaksolta uusaa, jos näiden kylmempien alueiden tiheys ei täytä vaatimuksia. Vaatimus koskee kohteita, joilla päälysteen lämpötila on mitattu käsikäyttöisellä laitteistolla. Jos taas käytössä on levittimeen asennettu infrapunapalkki, tulee työmenetelmiä muuttaa, jotta minimilämpötila ei seuraavalla jaksolla alita 28 °C (50 °F) raja-arvoa. (TxDOT 2011, Rand 2012.)

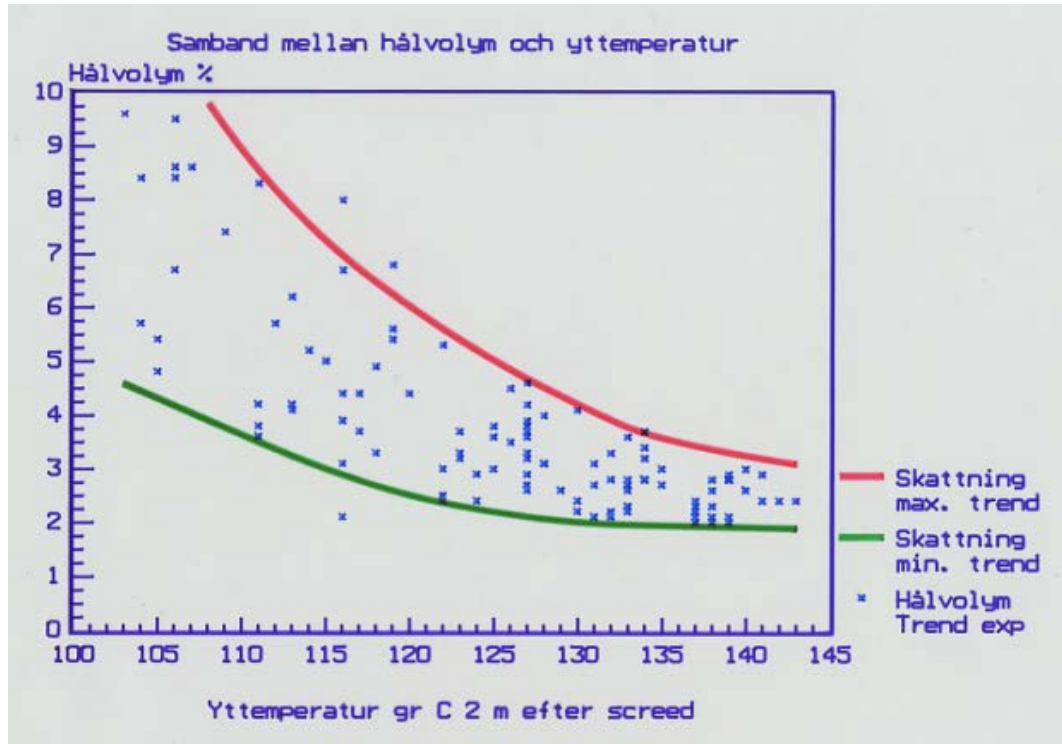
Washingtonin osavaltiossa lämpökameran käyttö on yhdistetty tiheysmittaukseen. Washingtonin osavaltion määrittämän työmenetelmän mukaan päälysteen lämpötilaa mitataan joko levittimeen asennettavalla laitteistolla tai käsikäyttöisellä lämpökameralla. Alueet, joissa lämpötila on yli 14 °C (25 °F) ympäröivää päällystettä alhaisempi, tulee mitata tiheysmittarilla riittävän tiheyden varmistamiseksi. Lisäksi silmämääräisesti havaitut harvemmat kohdat tulee myös mitata. Jos tarkasteltavalla jaksolla havaitaan yli 4 tiheysmittausten raja-arvon alittavaa mittaustulosta, määrätään kyseiselle jaksolle vähennystä urakkahinnasta. (WSDOT 2011.)

Yhdysvaltalainen tutkimusohjelma SHRP 2 tutki vuosina 2009–2010 neljässä päällystyskohteessa lämpökameran ja maatumakan käyttöä päällysteen tasalaatuisuuden todentamiseen ja mittaamiseen. Tutkimuksessa päällysteen lämpötilaa mitattiin infrapunapalkin avulla. Tutkimukseen osallistui neljä osavaltiota: Texas, Florida, Minnesota ja Maine. (Sebesta ym. 2013.)

Päällystetyyppi vaihteli tutkimuskohteittain. Yhdellä kohteella päällystetyyppinä oli SMA -päällyste, muilla kohteilla Yhdysvalloissa paljon käytetty Superpave SP-12.5 -päällyste. Jokaiselta kohteelta otettiin noin 10 poranäytettä valmiista päällysteestä lämpötila- sekä maatumakamittausten lisäksi. SMA -päällysteellä ei havaittu korrelaatiota tyhjätilan ja lämpötilan välillä, muilla kohteilla havaittiin selvä korrelaatio. Päällysteen lämpötilan laskiessa tyhjätilat kasvoivat. Vastaava korrelaatio havaittiin maatumakamittauksilla saatujen päällysteen tiheysarvojen ja lämpötilan välillä, pois lukien SMA -kohde. SMA -kohteella puolestaan havaittiin korrelaatio päällysteen rakeisuuden ja lämpötilan välillä. Päällystysolosuhteiden, kuten sateisen sään, arveltiin vaikuttavan tuloksiin SMA -kohteella. Kohteilla, joissa käytettiin lämminsekoitteista massaa, vaihtelivat tulokset selvästi. Toisella kohteella mitattiin selvästi suurempia tyhjätiloja kylmien alueiden kohdista, kun taas toisella kohteella erot tyhjätiloissa olivat varsin pienet. Lämminsekoitteisella massalla päällystettäessä massan reseptin todettiin vaikuttavan lopputulokseen. (Sebesta ym. 2013.)

Tutkimuksesta saatujen tulosten perusteella päällysteen lämpötilan mittausta ja maatumakaa pidettiin toimivina menetelminä päällysteen laadun arvioinnissa. Lämpötilan mittausta koettiin kehittyneemmäksi tekniikaksi ja erilaisia laitteita oli saatavilla runsaasti eri laitevalmistajilta. Maatumakamenetelmän heikkoutena koettiin mittaussaineiston työläs käsittely ja laskentaohjelmistojen heikko saatavuus. Maatumakan etuna koettiin se, että tiivistyksen vaikutus voidaan ottaa huomioon, sillä maatumakamittaus tehdään vasta tiivistyksen jälkeen. (Sebesta ym. 2013.)

Ruotsissa päällysteen pintalämpötilan mittaamista lämpökameran avulla testattiin ensimmäisen kerran jo vuonna 1988 Arlandassa. Jo tuolloin todettiin päällysteen lämpötilan ja tyhjätilan välillä olevan korrelaatiota kuten kuvasta 11 voidaan havaita. Tyhjätilan ja lämpötilan välillä vaikuttaisi olevan eksponentiaalinen korrelaatio. Päällysteen lämpötila mitattiin 2 m levittimen perän jälkeen ennen tiivistystä. (Andersson 2009.)



Kuva 11. Päällysteen lämpötilan ja tyhjätilan välillä havaittu korrelaatio vuonna 1988 Arlandassa tehdyssä tutkimuksessa (Andersson 2009).

Vuoden 1988 tutkimuksen pohjalta menetelmän kehittämistä jatkettiin vuonna 1991 Ruotsissa, jolloin tutkimuksen tuloksena määriteltiin raja-arvot sallituille lämpötilaeroille. Havaittiin, että 2 m levittimen perän jälkeen mitatun lämpötilan tulisi olla 10 % sisällä päällysteen keskilämpötilasta, jotta päällyste olisi riittävän homogeenista. (Andersson 2009.)

Vuonna 1994 alettiin kehitellä laitteistoa, jonka avulla voitaisiin tallentaa jatkuvaa dataa automaattisesti. Aikaisemmissa tutkimuksissa lämpötilan mittaamisessa käytettiin lämpökameraa, mutta jatkuvaan mittaamiseen todettiin sopivan paremmin linjaskanneri (kuva 12), sillä vuonna 1994 lämpökameralaitteisto ei ollut riittävän kehittynyttä jatkuvaan mittaamiseen. (Andersson 2009.)

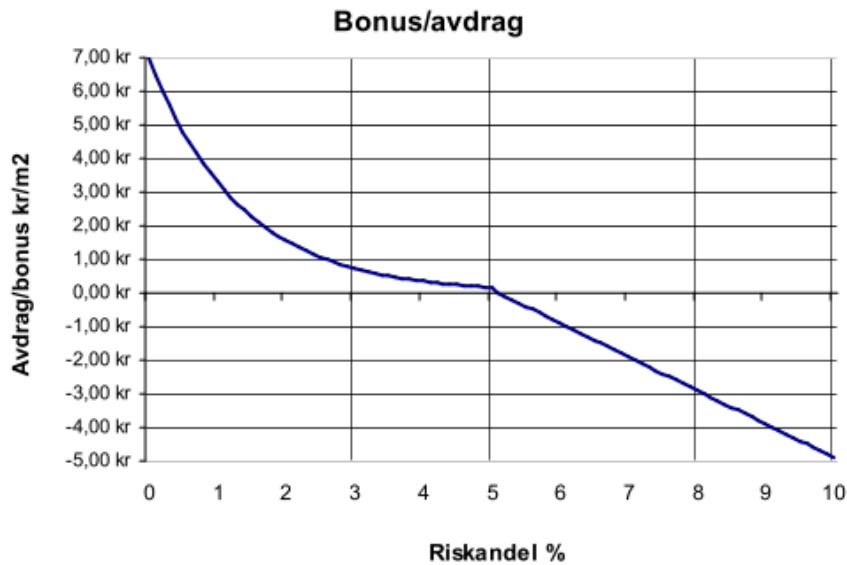


Kuva 12. Lämpötilan mittaamiseen käytetty linjaskanneri (Sävinger 2005).

Vuonna 1998 testattiin ensimmäisen kerran bonusjärjestelmän kytkemistä lämpötilamittauksiin. Riskialueiden summaaminen ja prosenttiosuuden laskeminen koko päällysteen pinta-alasta osoittautui toimivimmaksi ratkaisuksi. Ruotsissa riskialueet lasketaan liukuvasta keskiarvosta. Nykyisin käytössä oleva bonuslaskentamenetelmä otettiin käyttöön vuonna 1999. (Andersson 2009.)

Nykyäänkin Ruotsissa lämpötilan mittaaminen perustuu lämpökameran sijasta linjaskanneriin, joka on kiinteästi asennettu asfaltinlevittimeen. Ruotsin Vägverket on laatinut linjaskannerin käytöstä menetelmäkuvauksen. Lämpötilatieto sidotaan sijaintitietoon GPS -mittausten avulla. Päällysteen lämpötilaa voidaan tarkastella työnaikaisesti suoraan laitteiston näytöltä, joka mahdollistaa työmenetelmien muuttamisen välittömästi, jos laatupoikkeamia havaitaan. Laitteistossa on myös langaton tiedonsiirto, mikä mahdollistaa lämpötilatiedon tarkastelun internetin välityksellä esimerkiksi tietokoneelta tai matkapuhelimelta. Laitteiston näytölle on myös mahdollista liittää sääennuste sekä ilmoitus seuraavasta massakuormasta. Laitteisto voi myös lähettää tietoja tekstiviestillä työnjohdolle ja kuorma-auton kuljettajille. (Andersson 2009.)

Ruotsissa lämpötilatiedosta lasketaan tunnuslukuja, joiden avulla tarkastellaan päällystystyön onnistumista päällysteen keston kannalta. Näiden tunnuslukujen pohjalta tilaaja voi maksaa bonusta tai vaatia sakkoja. Bonus-sanktiomenettely perustuu riskialueiden laskemiseen. Riskialueena pidetään yksittäistä mittaustulosta, joka alittaa 90 % levityskaistan lämpötilan liukuvasta keskiarvosta tai mittaustulosta, joka alittaa työkohtaisessa työselityksessä massalle määrätyn alimman sallitun levityslämpötilan. Havaitut riskialueet lasketaan yhteen tarkasteltavalta paaluväliltä. Tämän jälkeen lasketaan riskiosuus, joka on riskipinta-alan osuus levitetystä päällysteen neliömäärästä prosentteina. Jos riskialueiden osuus päällystetystä pinta-alasta on alle 5 %, maksetaan bonusta oheisen kuvan (kuva 13) mukaisesta ja jos riskialueita on yli 5 %, tulee tarkasteltavalta jaksolta sakkoja. (Vasama 2007, Andersson 2009.)



Kuva 13. Ruotsissa käytetty bonus-sanktiojärjestelmä (Andersson 2009).

Ruotsalaisessa tutkimuksessa on havaittu levityslämpötilalla olevan yhteyttä päällysteen tyhjätilaan ja pintakärkeuteen, jotka poikkeavina johtavat ennenaikaiseen urautumiseen sekä päällysteen purkautumiseen. Tutkimuksessa moottoritiellä E18 päällystystyön aikana mitatut lämpötilaltaan poikkeavat alueet tarkastettiin kahdeksan vuoden kuluttua vaurioiden kartoittamiseksi. Kun riskialueen pinta-ala kasvoi yli 0,5 neliömetriin, riski vaurion esiintymiselle oli yli 40 %, kun alueilla, joissa levityslämpötila oli normaali, riski oli vain 20 prosenttia. Vastaavasti vuonna 2003 Ruotsissa tutkittiin massakuljettimen vaikutusta lämpötilaerojen minimoimisessa. Osuudella, jossa käytettiin massakuljetinta, lämpötilaerot olivat huomattavasti alhaisemmat kuin osuudella, jossa ei käytetty massakuljetinta. Kuormanvaihdossa lämpötila pysyi lähes yhtä korkeana kuin keskellä kuormaa, jos massakuljetin oli käytössä. Massakuljettimen käytön havaittiin myös pidentävän päällysteen elinikää hidastamalla urautumista. (Andersson 2009, Vasama 2007.)

Ruotsin lisäksi myös Norjassa on lämpökameratekniikkaa käytetty hyväksi laadunvarmistamisessa. Norjassa joissakin urakoissa voidaan päällysteen homogeenisuutta ja tasalaatuisuutta tarkastella lämpötilan avulla. Päällysteen lämpötila mitataan 1-2 m etäisyydeltä levittimen perän jälkeen ennen tiivistystä. Lämpötila-aineistosta lasketaan riskialueiden osuus koko päällysteen pinta-alasta kuten Ruotsissa. Norjassa raja-arvon alittavilta osuuksilta maksetaan bonusta. Jos riskialueiden osuus on annettua raja-arvoa suurempi, voidaan urakan takuu-aikaa pidentää. (Staten vegvesen 2005.)

2.4 Kotimaiset tutkimukset

Suomessa lämpökameran käyttöä päällystystöiden laadunarvioimiseen tutkittiin ensimmäisen kerran jo vuonna 1989. Tuolloin suoritettu tutkimus oli osa suurempaa asfalttipäällysteiden ASTO -tutkimusohjelmaa, joka oli käynnissä vuosina 1987–1992. Vuoden 1989 tutkimuksen tavoitteena oli selvittää lämpökameran soveltumista asfalttipäällysteen ja -massan lajittumisen kartoittamiseen. Lisäksi tutkimuksen yhteydessä selvitettiin, voitaisiinko lämpökameraa käyttää selvittämään lajittumista, joka syntyy asfalttiasemalla, kun massa pudotetaan sekoittimesta auton lavalle. (Laitinen 1990.)

Päällystettä kuvattiin heti levityksen jälkeen ennen tiivistämistä sekä tiivistämisen jälkeen, kun pintalämpötila oli noin 40–50 °C astetta. Tällä pyrittiin selvittämään, olisiko mahdollista lämpökameran avulla selvittää päällysteen lajittuneisuutta päällystystyön jälkeen, jolloin mittaamisesta ei aiheutuisi haittaa itse työlle. Päällystettä kuvattaessa heti levityksen jälkeen voitiin lämpökameralla havaita selviä kuormalajittumakohtia, jotka korreloivat hyvin päällystenäytteiden osoittamien lajittumien kanssa. Lajittumia oli nimenomaan kuormakatkosten kohdilla, joissa sideainepitoisuus oli alhaisempi ja rakeisuus karkeampi kuin kuorman keskellä. Lämpökameranauhalla lajittumakohdat kävivät hyvin yksiin päällystenäytteiden kanssa. Jäähdyneeltä päällysteeltä sen sijaan ei tiivistyksen jälkeen enää pystytty havaitsemaan eroja riittävän selvästi päätelmien tekemistä varten. (Laitinen 1990.)

Asfalttiasemalla massan pudotusta sekoittimesta ja massaa kuorma-autojen lavalla kuvattaessa selvien päätelmien tekeminen osoittautui hankalaksi erojen pienuuden ja massan pinnan nopean jäähtymisen vuoksi. Auton lavalla massan pinta jäähdyi 20 sekunnissa noin 10 °C, kun massan alkulämpötila oli 175 °C. Lisäksi havaittiin massan olevan kuorman laidoilla viileämpää kuin kuorman päällä. Todennäköisesti osa laidoilla ilmeneistä lämpötilaeroista johtui massan vierimisestä, osa laitojen aiheuttamasta massan jäähtymisestä. (Laitinen 1990.)

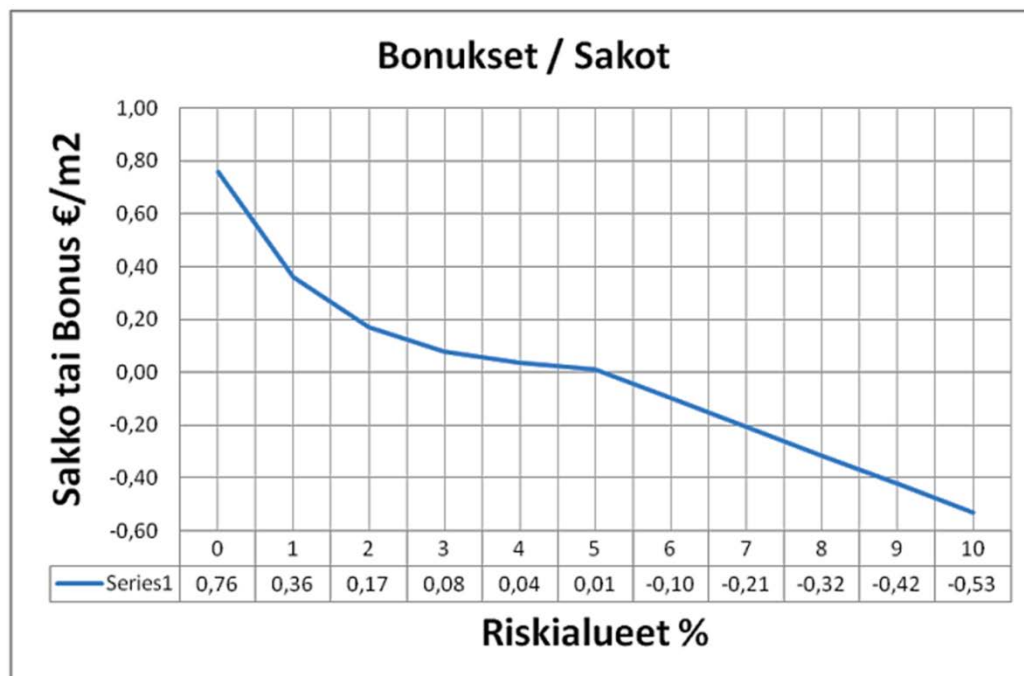
Vuoden 1989 tutkimuksen tuloksena todettiin lämpökameran havaitsevan päällysteen lajittumakohdat, kun päällysteen lämpötilaa mitataan heti levityksen jälkeen ennen tiivistystä. Lajittumakohdian pinta-alan absoluuttinen mittaaminen osoittautui kuitenkin lähes mahdottomaksi lämpötilaerojen nopean muuttumisen vuoksi. Tutkimuksissa käytetty laitteisto oli suurikokoinen ja raskas, mikä hankaloitti kameraläpötyä. Lisäksi tarkkan kuvan ottaminen osoittautui hankalaksi käytetyllä kameralla. Jo pelkästään käytännön hankaluuksien vuoksi lämpökameran ei nähty soveltuvan yleiseen päällysteen laadunarvosteluun lajittumien osalta. Tosin lämpökameraa pidettiin oivana välineenä tutkimustyön ja työnohjauksen kannalta. Asfalttiasemalla massan pudotusta sekoittimesta ja massaa auton lavalla kuvattaessa ei lämpökameralla saatu juuri mitään selviä tuloksia, joita voitaisiin käytännössä hyödyntää. (Laitinen 1990.)

Seuraavan kerran lämpökameran käyttöä ryhdyttiin tutkimaan Liikenneviraston toimesta vasta vuonna 2011, kun Liikennevirasto tilasi keväällä 2011 Roadscanners Oy:ltä selvityksen, jonka tarkoituksena oli selvittää lämpökameratekniikan hyödyntämistä uuden päällysteen tasalaatuisuuden laadunvarmistuksessa. Selvityksessä oli mukana kesän 2011 aikana kahdeksan päällystyskohdetta Uudenmaan ELY -keskuksen alueelta sekä yksi kohde Pirkanmaan ELY -keskuksen alueelta. Kohteilla mitattiin lämpökameralla erimittaisia jaksoja päällystystyön yhteydessä. Kohteiksi pyrittiin valitsemaan erityyppisiä päällystyskohteita, jotta kokemuksiä saataisiin mahdollisimman kattavasti erilaisista päällystystyöistä. (Pääkkö & Saarenketo 2011.)

Mittauksissa käytettiin Roadscanners Oy:n kehittämää tarkkuuslämpökameraan perustuvaa mittaus- ja tiedonsiirtotekniikkaa, joka perustuu Road Doctor™ -tuoteperheessä käytettyyn tekniikkaan. Mittauksissa levittimeen asennettiin lämpökamera sekä videokamera, jotka kuvasivat valmista päällystettä levittimen takana ennen tiivistystä. Lisäksi levittimeen asennettiin GPS -antenni paikannusta varten. Analysoinnissa mitatut jaksot visualisoitiin lämpötilamatoilla, jotka sidottiin tierekisteripaaluutukseen. Mittauksissa lämpökamera asennettiin levittimeen yhden työvuoron ajaksi, jolloin tietä päällystettiin noin 2-5 km. Vuorot kestivät keskimäärin 8-12 tuntia. (Pääkkö & Saarenketo 2011.)

Lämpökameramittausten lisäksi selvityksessä tehtiin maatutkamittauksia, joiden avulla oli tarkoituksena selvittää lämpötilan ja dielektrisyiden välistä yhteyttä. Maatutkamittauksia tehtiin neljällä tutkimukseen osallistuneella kohteella. Tutkaus tapahtui kuten tyhjätilamittauksissa, mutta kultakin tutkitulta kaistalta mitattiin viisi linjaa. Linjoista tehtiin dielektrisyyskartta sekä pituusprofiilit ja näitä tuloksia verrattiin lämpötilamittausten kanssa. Tutkamittausten tuloksissa, ei yhtä kohdetta lukuun ottamatta, löydetty selvää korrelaatiota lämpökameramittausten kanssa. Toisaalta mitatuissa dielektrisyysarvoissa ja päällysteen lämpötiloissa havaittiin selviä toistuvia trendejä, jotka näyttäisivät liittyvän päällysteen laatuun. Kohteella jossa korrelaatio oli selkeä, tutkamittaukset tehtiin välittömästi päällystämisen jälkeen. Muilla kohteilla päällystämisen jälkeen oli kulunut 3-4 kuukautta. (Pääkkö & Saarenketo 2011.)

Kohteet joista saatiin riittävästi aineistoa, raportoitiin Ruotsissa Tukholman tiepiirissä käytössä olevan laskennan avulla. Laskennassa kohteet jaettiin 100 m jaksoihin, minkä jälkeen niistä laskettiin riskialueiden osuus. Riskialueeksi katsottiin kohdat, joissa pinnan yksittäiset lämpötila-arvot olivat alle 90 % jakson keskilämpötilasta. Tällaisten jaksosten katsottiin olevan riskivyyhykkeellä, jolloin esimerkiksi tiivistymistä ei mahdollisesti tapahtunut riittävästi normaaliyräyksellä. Laskukaava laski bonukset ja sakot neliöinä, joten myös jaksot muutettiin neliöksi. Koska tarkkaa päällystelevyyttä ei laskentaja tehtäessä ollut tiedossa, käytettiin kaikissa laskennoissa kaistaleveytenä 3,2 m. Kun riskialueita oli 100 m matkalla vähemmän kuin 5 %, tuli jaksolta bonusta kuvassa 14 esitetyn kaavion mukaisesti. Jos taas riskialueita oli enemmän kuin 5 %, tuli jaksolta sakkoa. Laskennoissa ei oteta huomioon alle 90 °C lämpötiloja, koska näiden lämpötilojen voitiin olettaa johtuvan henkilöistä, jotka työskentelevät lämpökameran mittausalueella. Lisäksi laskennassa ei otettu huomioon päällystetyn alueen reunaa. (Pääkkö & Saarenketo 2011.)



Kuva 14. Bonuksen ja sakon määräytyminen vuoden 2011 tutkimuksessa (Pääkkö & Saarenketo 2011).

Mittauksissa havaittiin merkittäviä lämpötilavaihteluita lähes jokaisella kohteella ja niinpä Ruotsin Tukholman tiepiirissä käytössä oleva laskentakaava olisi tuonut sakkoja

kaikille kohteille kahta kohdetta lukuun ottamatta. Nämä kaksi kohdetta olivat molemmat Remix -kohteita. Remix -kohteilla levittimen liike oli tasaista ja lämmityksen vuoksi kohteilla pyrittiin välttämään ylimääräisiä pysähdyksiä. Tämä johti tasaisiin lämpötiloihin. Kohteilta otettiin myös satunnaisia yksittäisiä massanäytteitä, jotka tutkittiin laboratorioissa. Muutamaa yksittäistä näytettä lukuun ottamatta näytteiden laboratoriotulokset olivat laaturajojen sisäpuolella. Poikkeavissa massanäytekohdissa ei havaittu merkittäviä lämpötilapoikkeamia. (Pääkkö & Saarenketo 2011.)

Yhdellä kohteella päällyste mitattiin uudelleen lämpökameralla samana päivänä päällystämisen jälkeen. Mittauksella haluttiin selvittää, päästäisiinkö jälkikäteen tehdyllä mittauksella samaan tulokseen kuin päällystystyön kanssa samaan aikaan tehdyllä mittauksella. Mittaus tehtiin asentamalla lämpökamera mittausautoon, minkä jälkeen juuri päällystetty osuus ajettiin kertaalleen läpi. Mittausdatasta muodostettiin samanlainen lämpötilamatto kuin lämpökameran ollessa kiinnettynä levittimeen ja mattoja vertailemalla selvitettiin kuinka hyvin lämpötilamuutokset näkyvät jälkikäteen. Noin tunti levityksen jälkeen suoritettu uusintamittaus korreloi selvästi ensimmäisen mittauksen kanssa, vaikka lämpötilaerot olivat pienentyneet huomattavasti. Reuna-alueiden havaittiin myös jäähtyvän kaistan keskiosaa nopeammin. Kun toistomittaushetkellä päällystämisestä oli kulunut 12 tuntia, korrelaatio oli vielä havaittavissa, mutta lämpötilaerot olivat pienentyneet edellisestä alle puoleen. Tulokset osoittivat, että samana päivänä jälkikäteen suoritettu mittaus ei ole tarpeeksi luotettava, jotta sitä voitaisiin käyttää laadunvalvonnassa. (Pääkkö & Saarenketo 2011.) Tulos on yhtenevä 1990-luvun alussa ASTO - tutkimusohjelmassa saatujen tulosten kanssa.

Vuoden 2011 selvitys onnistui ensisijaisessa tavoitteessaan selvittämään tekniikan toimivuutta ja käyttökelpoisuutta. Tulokset osoittivat, että merkittäviä lämpötilavaihteluja esiintyi kaikilla tutkituilla päällystyskohteilla. Lämpötilan suoranaista vaikutusta päällysteen laatuun ei kuitenkaan voitu tutkimuksessa pitävästi osoittaa. Selvityksessä havaittiin lämpötilavaihteluiden johtuvan lähes kokonaan työtekniikasta. Alhaiset lämpötilat sijoittuivat selvästi kohteisiin, joissa levitin oli pysähtynyt pidemmäksi ajaksi sekä kohteisiin, joissa massan kuljetusmatkat olivat pidemmät. Kaikissa näissä kohteissa työn tulosta olisi tutkimuksen mukaan voitu parantaa, jos levittimellä työskentelevä henkilöstö olisi hyödyntänyt lämpökameran antamaa informaatiota ja siten olisi voinut reagoida havaittuihin puutteisiin muuttamalla työmenetelmiä. Ruotsissa juuri tämä on ollut tehtyjen kokeiluiden suurin etu. (Pääkkö & Saarenketo 2011.)

Maatutkatulosten ja lämpökameratulosten vertailussa saatiin näyttöä päällysteen matalamman lämpötilan ja korkean tyhjätilan suhteesta vain yhdellä kohteella, jossa maatutkamittaukset suoritettiin heti päällystystyön jälkeen. Kuitenkin aikaisemmat yhdysvaltalaiset tutkimukset ovat osoittaneet, että alhaisissa lämpötiloissa tiivistettyjen massojen tyhjätilat ovat vastaavia lämpimiä massoja suuremmat. Lisäksi Ruotsissa Roadscanners Oy:n tekemissä testeissä on havaittu kuormalajittumien ja saumalajittumien erottuvan erinomaisesti päällysteen pinnan dielektrisyysarvoissa. (Pääkkö & Saarenketo 2011.)

Yksi selvityksen tavoitteista, miten lämpökameradata ohjaa levitinryhmän toimintaa, jäi saavuttamatta, sillä lämpökameradatan reaaliaikaisen näytön kanssa oli ongelmia. Lisäksi kohteilla havaittiin myös jonkin verran mittausteknisiä ongelmia, joista yhtenä esimerkkinä käytetty paikannusmenetelmä. Selvityksessä todettiin, että hyvälaatuisenkin GPS -antennin tuottama data vaatii prosessointia jälkikäteen, jotta mittaukset saadaan tarkalleen oikeille paikoilleen. Tämän vuoksi pohdittiin mahdollisen pulssianturin käyttöä jatkossa GPS -antennin lisäksi, jolla mahdollisesti saataisiin tarkempaa etäisyys-

tietoa. Ongelmia havaittiin myös päällystystöissä sateen aikana. Sateella ilmaan höyrystyi kosteutta, joka tiivistyi lämpökameran linssiin estäen luotettavien tulosten saamisen. Vaikka selvityksen mukaiset tavoitteet eivät kaikilta osin toteutuneetkaan, koettiin menetelmästä saatavien potentiaalisten hyötyjen olevan kuitenkin niin suuria, että menetelmän jatkokehittämistä suositeltiin jatkettavaksi vuonna 2012. (Pääkkö & Saarenketo 2011.)

Vuonna 2012 lämpökameran käytön selvittämistä jatkettiin edellisen vuoden kokemusten pohjalta. Roadscanners Oy teki mittauksia Etelä-Pohjanmaan ELY -keskuksen päällystysurakan kohteella valtatiellä kahdeksan. Lämpökamera oli asennettuna levittimen perään koko kohteen ajaksi, jotta lämpökameradatan käytöstä saataisiin yhtäjaksoista kokemusta. Mittausmenetelmää paranneltiin vuonna 2011 havaittujen ongelmakohtien perusteella. Muutoksiin kuului muun muassa pulssianturin asentaminen levittimeen, jotta paikkatieto pystyttäisiin määrittämään tarkemmin, sillä GPS -antennin havaittiin olevan epätarkka alhaisissa levitysnopeuksissa. Vuonna 2011 lämpökameradatan reaaliaikainen seuranta ei onnistunut teknisten ongelmien vuoksi. Vuodelle 2012 ongelma saatiin korjattua ja lämpötilan seuraaminen laitteistoon kuuluneen näytön kautta oli mahdollista. Vuoden 2012 mittauksista ei ole julkaistu raporttia.

3 Tutkimuskohteet

Tutkimuskohteet valittiin yhdessä Liikenneviraston ja ELY- keskusten kanssa. Tutkimukseen pyrittiin valitsemaan päällystyskohteita, joiden pituus olisi useita kilometrejä, jotta saataisiin riittävän edustava aineisto. Lisäksi tavoitteena oli suorittaa tutkimus kohteilla, joissa päällystetyyppinä oli joko kivimastikiasfaltti (SMA) tai asfalttibetoni (AB). Sopivia AB-kohteita ei kuitenkaan tarjoutunut, joten kaikilla tutkimukseen valituilla kohteilla päällystetyyppinä oli SMA maksimiraekoon ollessa joko 16 tai 22 mm.

Tutkimukseen valituilla kohteilla päällystystyöt suoritettiin kesällä 2013 toukokuun puolesta välistä elokuun puoleen väliin sijoittuneella ajanjaksolla. Lämpökamera asennettiin levittimeen mittaamaan päällysteen pintalämpötilaa noin 2 m levittimen perän jälkeen ennen tiivistystä koko kohteen ajan.

3.1 VT1 - Salo

Valtatiellä 1 sijaitsevan kohteen uudelleenpäällystettävän tieosan pituus oli 8,25 km. Kohde oli 2-ajoratainen ja 4-kaistainen, jonka kaikki kaistat päällystettiin. Ajokaistan leveys oli 4,5 m. Kohteen sijainti on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Kohteen VT1 sijainti kartalla (Roadscanners Oy 2014).

Päällystetyyppinä kohteella käytettiin SMA 16 -massaa massamäärän ollessa 100 kg/m². Työmenetelmänä käytettiin massapintausta ja kaistan leveys oli 4,5 metriä. Kohde päällystettiin toukokuun aikana.

Kuljetusmatka asfalttiasemalta kohteelle oli tutkimuksen pisin, keskimäärin 50 km. Kuljetukseen käytettiin 12–14 kuorma-autoa. Päällysteen levittämiseen käytettiin Vögelen valmistamaa Super 2100 tela-alustaista levitintä. Päällysteen tiivistäminen tapahtui kolmella jyrällä. Kaksi jyrää oli HAMM HW90 -mallin staattisia valssijyriä. Yksi jyrä oli täyryllä varustettu HAMM DV90.

3.2 VT3 - Tampereen läntinen kehätie

Valtatie 3:n kohde oli osa suurempaa päällystyskohdetta, johon kuului myös osuudet valtateista 9 ja 12. Tässä tutkimuksessa keskityttiin ainoastaan valtatie 3:n päällystyskohteeseen, vaikka lämpökamera oli käytössä myös valtateiden 9 ja 12 osuuksilla. Valtatien 3 kohteiden sijainnit on esitetty seuraavissa kuvissa (kuvat 16 ja 17).



Kuva 16. Kohteen VT3 tieosan 139 sijainti kartalla (Roadscanners Oy 2014).



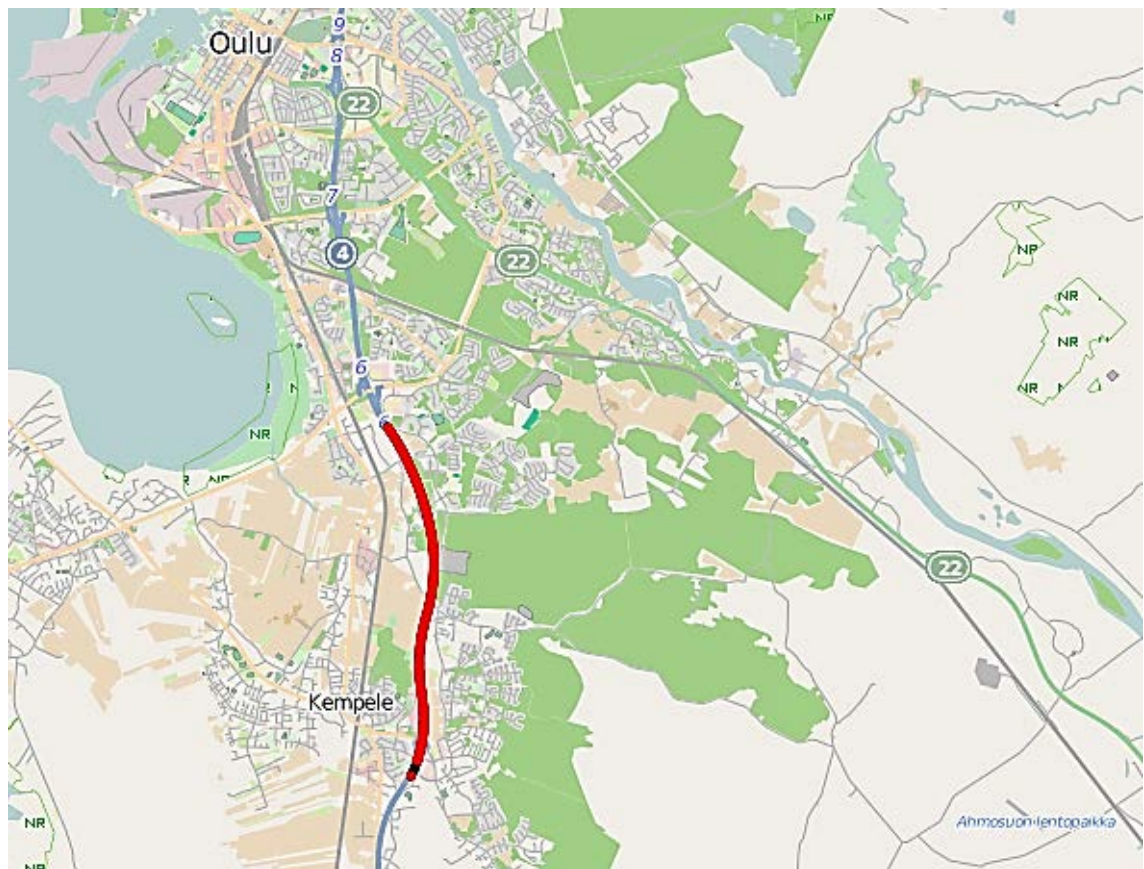
Kuva 17. Kohteen VT3 tieosan 136 sijainti kartalla (Roadscanners Oy 2014).

Valtatiellä 3 päällystetyyppinä oli niin ikään SMA 16 -massa, mutta valtatie 1:stä poiketen massamääränä oli 90 kg/m². Työmenetelmänä käytettiin massapintausta. Kohteen pituus oli 5,22 km. Kohde oli 2-ajoratainen ja 4-kaistainen, ajokaistan leveys oli 4,5 m. Päällystystyö oli käynnissä heinäkuun puolesta välistä elokuun alkuun.

Kuljetusmatka asfalttiasemalta päällystyskohteeseen oli tutkimuskohteista lyhyin, noin 22 km. Kuljetuskalustona käytettiin 10–12 kuorma-autoa. Levittimenä toimi Vögelen valmistama Super 1900-2 -telamalli. Tiivistyksessä käytettävä etujyrrä oli täryllä varustettu HAMM HD90. Kaksi muuta jyrrää oli staattisia HAMM HV90 -malleja.

3.3 VT4 - Kempele

Valtatie 4:llä sijaitsevan kohteen pituus oli 6,14 km. Kohde oli 2-ajoratainen ja 4-kaistainen. Ajokaistan leveys kohteella oli 4 m. Kohteen ohituskaistoja ei päällystetty yhtä pitkältä matkalta. Kohteen sijainti on esitetty oheisessa kuvassa (kuva 18).



Kuva 18. Kohteen VT4 sijainti kartalla (Roadscanners Oy 2014).

Valtatie 4:n kohde poikkesi muista kohteista käytetyn massan osalta. Kohteella käytetty päällystetyyppi oli SMA 22 -massaa, joten tällä kohteella maksimiraekoko oli muita koekohteita suurempi. Siksi myös massamäärä oli suurempi (120 kg/m^2), työmenetelmänä oli massapintausta. Kohteella työskenneltiin heinäkuun alusta heinäkuun loppuun.

Kuljetusmatka asfalttiasemalta päällystyskohteelle oli keskimäärin 27 km. Massan kuljetusta varten käytössä oli 12 kuorma-autoa. Levitin oli Vögelen valmistama uudehko Super 1900-2. Päällysteen tiivistyksessä käytettiin kolmea jyrrää, etujyrränä toimi staattinen valssijyrrä HAMM HV90, kaksi muuta jyrrää olivat Ammann ATV85-2 täryjyriä.

4 Tutkimusmenetelmät

Seuraavissa kappaleissa on kuvattu tutkimuksessa käytetyt menetelmät. Työ koostui kahdesta osasta: kenttätutkimuksesta ja laboratoriotutkimuksesta. Kenttätutkimukseen kuuluivat työmaakäynnit, joiden aikana tarkkailtiin lämpökameran toimintaa osana levi-tysryhmän työskentelyä. Työmaakäyntien havainnot kirjattiin ylös liitteen 1 lomakepoh-jalle.

Päällystyskohteilta otettiin poranäytteitä valmiista päällysteestä, jotta päällysteen laatua ja ominaisuuksia voitaisiin tutkia tarkemmin laboratoriomittausten avulla. Lisäksi val-miille päällysteelle teetettiin palvelutasomittauksia.

4.1 Kenttätutkimus

4.1.1 Lämpökameramittaukset

Lämpökameramittauksissa käytettiin Roadscanners Oy:n kehittämää tarkkuuslämpöka-mera-an perustuvaa mittaus- ja tiedonkeruutekniikkaa. Laitteisto koostui lämpökameras-ta, GPS -antennista, mittapyörästä, tiedonsiirtotekniikasta sekä näytöllä varustetusta tietokoneesta. Lämpökamerana käytettiin jokaisella kohteella FLIR Systems Inc:n val-mistamaa kameraa, jonka resoluutio on 320x240 pikseliä.

Lämpökamera asennettiin levittimen perään rakennettuun telineeseen. Kameran asennus telineeseen tapahtui pulttikiinnityksellä. Kuvassa 19 on esitetty kameran kiinnitys levit-timeen. Lämpökamera suunnattiin korkeintaan 45 asteen kulmassa kuvaamaan valmista päällystettä siten, että koko päällystettävä kaista tulee tallennetuksi sekä mahdollisim-man vähän kaistaa ympäröivää aluetta näkyisi kuvassa. Päällysteen pintalämpötila mi-tattiin noin 2 metrin etäisyydeltä levittimen perän jälkeen ennen jyräystä. GPS -antenni asennettiin levittimessä paikkaan, jossa antennilla olisi mahdollisimman esteetön näky-mä taivaalle. GPS paikkatiedon lisäksi levittimeen asennettiin mittapyörä mittaamaan kuljettua etäisyyttä, koska GPS -antennilla epäiltiin olevan vaikeuksia päästä tavoitel-tuun tarkkuuteen.



Kuva 19. Lämpökameran kiinnitys levittimeen (Nevalainen 2013).

Laitteistoon kuulunut tietokone pyrittiin asentamaan paikkaan, josta työntekijöiden olisi helppo seurata näytön tarjoamaa informaatiota. Tietokone oli pakattu kompaktiin salk-

kuun asennuksen helpottamiseksi. Näyttö oli upotettu salkun kylkeen. Asennuspaikka vaihteli työmaittain. Valtatie 4:n urakassa levittimen perässä oli lukollinen varustekaappi, jonne tietokonesalkun sai luontevasti sijoitettua ja näyttö oli helposti luettavissa (kuva 20).



Kuva 20. Lämpökameralaitteistoon kuuluva tietokoneyksikkö sijoitettiin levittimen lukittavaan työkalukaappiin kohteella VT4 (Nevalainen 2013).

Valtatie 1:n sekä valtatie 3:n urakoissa tietokoneen sijoittaminen oli hankalampaa. Valtatiellä 1 käytetyssä levittimessä tietokonesalkku ripustettiin levittimen katosta roikkumaan (kuva 21). Näyttöä oli hankala seurata työn ohella salkun sijainnin vuoksi. Valtatiellä 3 tietokone sijoitettiin levittimen ohjauspulpetille, jossa näyttö oli pääasiassa levittimen kuljettajan näköpiirissä (kuva 22).



Kuva 21. Tietokoneyksikkö sijoitettiin kohteella VT1 roikkumaan levittimen kattoon (Nevalainen 2013).



Kuva 22. Kohteella VT3 tietokoneyksikkö sijoitettiin levittimen liikutettavalle ohjauspulpetille (Nevalainen 2013).

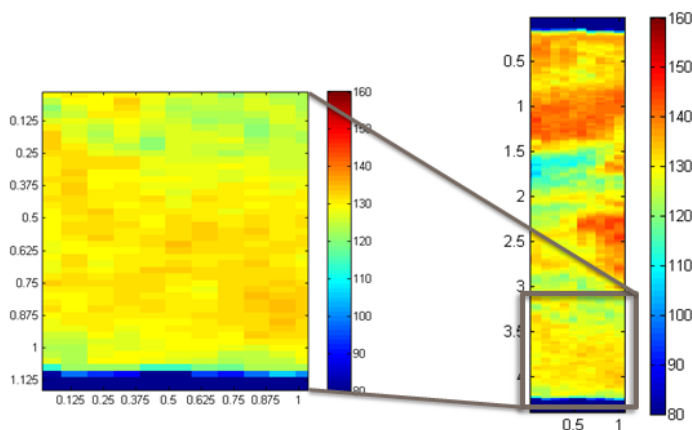
Lämpökamera jouduttiin ottamaan jokaisen työvuoron päätteeksi irti telineestään ja levittimestä, jottei arvokas kamera joutuisi vääriin käsiin. Lämpökameran ja telineen välinen pulttikiinnitys ei saanut positiivista palautetta urakoitsijoilta. Ainakin yhdellä työmaalla pulttikiinnitys hajosi ja urakoitsija havaitsi helpommaksi irrottaa kameralineineen levittimestä. Lämpökameran lisäksi myös näytöllä varustettu tietokonesalkku poistettiin levittimestä työvuoron päätteeksi pois luettuna valtatie 4:n kohde, jossa tietokone voitiin säilöä lukittuun varustekaappiin. Koska laitteisto oli irrotettava levittimestä useita kertoja, laitteistoon kuuluvat johdot oli asennettava pintavetona. Urakoitsijoilta saamien kommenttien mukaan johdot olivat paikoin tiellä häiritsemässä työskentelyä. Esimerkiksi valtatiellä 3 levitin oli varustettu siirrettävällä ohjauspulpetilla ja tietokonesalkku jouduttiin siirtämään aina kun pulpettia siirrettiin, sillä tietokone oli sijoitettu pulpetin päälle. Valtatie 1:n kohteella laitteistoon kuulunut tietokone sammui muutamia kertoja urakan aikana, koska tietokone oli sijoitettu liian lähelle kuumaa massaa ja tämän vuoksi laitteisto kuumeni liikaa.

Jokaisella kohteella vierailtiin seuraamassa lämpökameran toimintaa yhden työvuoron ajan. Työntekijät eivät yleensä seuranneet lämpökameralaitteiston näytöltä saatavaa informaatiota. Haastateltaessa levitystyöryhmän jäseniä monet kertoivat pitävänsä lämpökameralaitteistoa turhana oman työnsä kannalta ja luottavansa mieluummin vahvaan ammattitaitoonsa. Työt tehtiin monen vuoden kokemuksen perusteella. Useat työntekijät kokivat laitteiston haittaavan työntekoa, sillä laitteiston asennus ja purkaminen työvuorojen välissä lisäsi työtaakkaa. Osittain lämpökameran hyödyntämistä hankaloitti myös näytöllisen tietokonesalkun sijainti levittimessä.

Lämpötila-aineistoa käsiteltiin Roadscanners Oy:n kehittämän web-palvelun avulla. Web-palvelussa on mahdollista tarkastella lämpötilamattoja karttapohjalla. Lämpötilamattoihin on mahdollista yhdistää erilaisia tunnuslukuja, kuten levittimen nopeus, pyrsähdysten pituus, lämpötilan 100-metrin juokseva keskiarvo jne. Lämpökameran tuotetun raakadatan lataaminen Excel -muodossa onnistui suoraan web-palvelun kautta.

Palvelun käyttöliittymä havaittiin hyväksi ja aineiston tarkastelu oli vaivatonta. Ainoastaan raakadatan lataamisen havaittiin olevan hidasta tiedostojen suuren koon vuoksi. Palvelun avulla on myös mahdollista seurata lämpötilatietoja reaaliajassa. Ominaisuus ei kuitenkaan ollut urakoitsijoiden käytössä, sillä palvelua ei saatu valmiiksi urakoiden alkaessa.

Web-palvelussa lämpötilamattoja pystyttiin katselemaan vain 100 ja 200 m pituisissa jaksoissa. Lyhyempien osuuksien tarkastelu koettiin puutteena tutkimuksen kannalta ja siitä syystä Aalto-yliopistossa kehiteltiin MatLab -laskentaohjelmistoon perustuva ohjelma, jolla voitiin luoda tarkempia lämpötilamattoja. Ohjelma käyttää visuaalisen esityksen luomiseen web-palvelusta ladattua raakadataa. Ohjelmalla on myös mahdollista laskea valitulle alueelle tunnuslukuja, joita ovat mm. lämpötilan keskiarvo, keskihajonta sekä minimi- ja maksimiarvo. Kuvassa 23 on esitetty Matlab -ohjelmalla muodostettu lämpötilamatto poranäytteiden kohdalta.



Kuva 23. Esimerkkikuva Matlab -ohjelmalla laaditusta lämpötilamatosta.

Urakoissa oli lisäksi mahdollista saada bonusta, jonka suuruus määräytyi lämpökameradatan perusteella. Roadscanners Oy laatimat laskentaperusteet bonuksen määräytymiselle perustuvat ruotsalaisten käyttämään laskentamalliin, jota on muokattu edelleen. Bonuslaskelmassa tarkasteltiin pysähdysten määrää, kylmien alueiden osuutta sekä niin kutsuttujen riskialueiden osuutta. Kohteet jaettiin kilometrin mittaisiin jaksoihin tarkastelua varten. (POP ELY 2013.)

Pysähdysten osalta bonus määräytyi siten, että kilometrin matkalle sallittiin yhdeksän pysähdystä. Jos pysähdyksiä ei ollut lainkaan, sai kyseiseltä jaksolta täyden bonuksen pysähdysten osalta. Yksi pysähdys vähensi bonuksen suuruutta 10 prosentilla. Jos kilometrin jaksolla oli pysähdyksiä yli yhdeksän, ei jaksolta maksettu bonusta pysähdysten osalta. Pysähdyksiksi laskettiin kaikki yli 2 min kestäneet pysähdykset ja kaikki 5 m sisällä tapahtuneet pysähdykset laskettiin yhdeksi pysähdykseksi. Pysähdysten laskemisessa käytettiin hyödyksi tietoa levittimen nopeudesta, joka saatiin mitattua levittimeen kiinnitetyn pulssianturin avulla. (POP ELY 2013.)

Kylmiksi alueiksi oli määritelty alle 80 % tavoitelämpötilan alle jäävät alueet (m²). Kaikilla kohteilla tavoitelämpötilaksi asetettiin 150 °C, jolloin raja-arvona kylmille alueille käytettiin 120 °C lämpötilaa. Laskennassa jätettiin huomiotta 30 cm päällysteen molemmilta reunoilta. Lisäksi jätettiin huomiotta alle 80 °C lämpötilapisteet, sillä näiden pisteiden ei oletettu edustavan päällysteen lämpötilaa. Alle 80 °C lämpötilapisteitä saavat aikaan lämpökameran edessä liikkuva jyräyskalusto sekä työmiehet. Kylmien aluei-

den osalta bonusta maksettiin, jos näiden alueiden pinta-ala oli alle 0,1 % päällysteen pinta-alasta kilometrin matkalla. Kun kylmien alueiden osuus oli yli 0,1 %, ei kyseiseltä jaksolta maksettu bonusta. (POP ELY 2013.)

Riskialueiksi oli määritelty ne alueet, joissa lämpötila on alle 90 % edellisen 100 metrin keskiarvolämpötilasta. Riskialueilla pyrittiin kuvaamaan päällysteen homogeenisuutta. Myös riskialueiden osalta tarkastelusta jätettiin pois 30 cm päällysteen reunoilta sekä alle 80 °C lämpötilapisteet. Urakoitsijalle maksettiin täysi bonus riskialueiden osalta, jos riskialueiden osuus oli alle 0,5 % päällysteen pinta-alasta kilometrin jaksolla. Raja-arvo bonukselle oli 5 % päällysteen pinta-alasta kilometrillä. Alla on esitetty taulukko maksettavan bonuksen määräytymisestä (taulukko 3). (POP ELY 2013.)

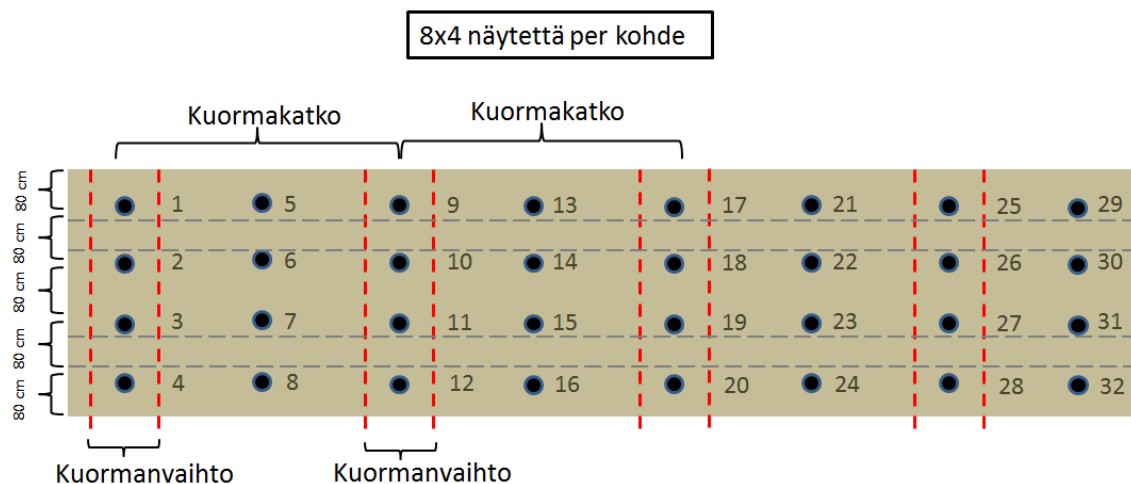
Taulukko 3. Bonuksen määräytyminen riskialueiden osalta.

Homogeenisuuden raja-arvo (Riskialueet, $T < 0,9 * K_a$)	Bonus
< 0,5 %	100 %
0,5 – 1,0 %	90 %
1,0 – 1,5 %	80 %
1,5 – 2,0 %	70 %
2,0 – 2,5 %	60 %
2,5 – 3,0 %	50 %
3,0 – 3,5 %	40 %
3,5 – 4,0 %	30 %
4,0 – 4,5 %	20 %
4,5 – 5,0 %	10 %
> 5,0 %	0 %

Lopullinen bonus jokaiselle jaksolle määräytyi pysähdyksistä, kylmistä alueista sekä riskialueista laskettujen bonusten summasta siten, että pysähdysten painoarvo oli 35 %, kylmien alueiden 45 % ja riskialueiden 20 %. Bonuslaskelma edellytti, että kultakin kilometrin jaksolta oli saatu kerättyä riittävä määrä edustavia mittaustuloksia. (POP ELY 2013.)

4.1.2 Näytteenotto

Jokaiselta päällystyskohteelta otettiin poranäytteitä laboratoriotutkimusta varten. Poranäytteiden sijainti määritettiin lämpökameran tuottaman datan perusteella. Oheisessa kuvassa (kuva 24) on esitetty havainnekuva näytteenottokaaviosta. Yhteensä kuusitoista näytettä porattiin kuormanvaihtojen kohdalta, missä päällysteen pintalämpötila oli alhaisempi. Vastaavasti 16 näytettä otettiin kuorman keskeltä, missä lämpötila oli tasaisempi ja korkeampi. Kaistan leveyssuunnassa otettiin neljä näytettä tasaisin välein. Leveyssuunnassa näytteenottoväli vaihteli kaistan leveyden mukaan ja oli joko 80 cm tai 90 cm. Pituussuunnassa näytekohtia oli kahdeksan, neljä kuormanvaihtoa ja neljä kohtaa kuormien keskeltä. Kuvassa 25 on esitetty esimerkki näytteenotosta.



Kuva 24. Havainnekuva poranäytteidenottokaaviosta, kuvassa ajokaistan leveys on 4 m. Oletetut ajourat on merkitty katkoviivoin.



Kuva 25. Näyte porattu irti valmiista päällysteestä (Nevalainen 2013).

Valtatie 3:n ja valtatie 4:n urakoissa poranäytteiden ottokohdat valittiin työmaavierailun aikana lämpötilamaton perusteella, jota tarkasteltiin levittimeen kiinnitetyltä tietokoneen näytöltä. Sopivat näytteenottokohdat merkittiin maalimerkinnällä päällysteen laitaan. Valtatiellä 1 ei urakan aikaisen ajankohdan vuoksi ollut mahdollisuutta näytekohtien merkitsemiseen työmaakäynnin aikana. Näytekohdat valittiin päällystystyön päätyttyä Roadscanners Oy:n toimittamasta lämpötila-aineistosta, josta muodostetun lämpötilamaton avulla valittiin sopivat näytteenottokohdat. Näytteenotto tapahtui erillisillä liikennejärjestelyillä heinäkuun alussa noin puolitoista kuukautta päällystystyön päättymisen jälkeen.

Näytteidenotto tapahtui valtatiellä 4 pian näytekohtien merkitsemisen jälkeen saman työvuoron aikana, jolloin voitiin työskennellä samojen liikennejärjestelyjen sisällä. Näytteet porattiin vain muutama tunti päällystämisen jälkeen, minkä seurauksena osa näytteistä ei ollut vielä jäähtynyt ja kovettunut kunnolla, eivätkä siksi pysyneet täysin pyöreinä. Valtatiellä 3 näytteet porattiin irti päällysteestä merkitsemistä seuraavana päivänä urakoitsijan järjestämällä liikennejärjestelyillä noin vuorokausi päällystystyön päättymisestä.

Kaikista päällysteestä irti poratuista näytteistä määritettiin laboratoriossa massan maksimitiheys, päällysteen kappaleitiheys, sideainepitoisuus, tyhjätila sekä rakeisuus. Jokaiselta kohteelta valittiin kahdeksan poranäytettä, joista määritettiin edellä mainittujen kokeiden lisäksi päällysteen halkaisuvetolujuus sekä jäykkyys. Laboratoriomittauksista on kerrottu tarkemmin kohdassa 4.2.

4.1.3 Palvelutasomittaukset

Tutkimusta varten jokaisella kohteella suoritettiin palvelutasomittauksia noin 2-3 kulkukautta päällystystyön valmistumisen jälkeen. Palvelutasomittauksen tarkoituksena oli tutkia, havaitaanko lämpötilaeroja tai lajittumia päällystämisen jälkeen tehtävissä ainetta rikkomattomissa tutkimittauksissa. Mittauksista vastasi Destia Oy.

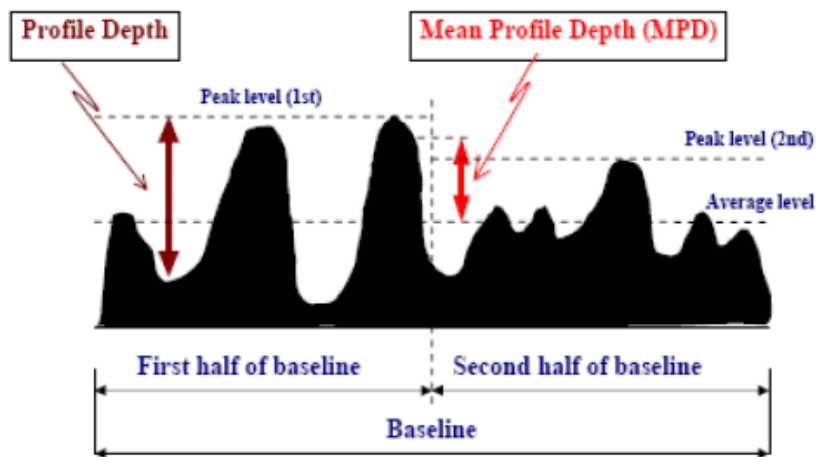
Päällystetyn tieverkon kuntoa voidaan mitata lasermittauskalustoon perustuvilla palvelutasomittauksilla, jotka tuottavat joukon erilaisia tunnuslukuja. Palvelutasomittauksista käytetään lyhennettä PTM. PTM -mittauksia on tehty vuodesta 2003 lähtien lasertekniikalla. Mittaukset suoritetaan PTM -autolla (Tiehallinto 2005.). Tiepäälllysteen tasaisuutta mitataan tieverkon kunnan inventoimisen lisäksi myös päällystystyön laadun tarkastamiseksi. PTM -mittaustietojen keräämiseen hyödynnetään laserantureita, pystykiehtyvyyssantureita sekä kiihtyvyyssantureita. Laseria käytetään tien pinnan ja auton korin välisen etäisyyden mittaamiseen ja kiihtyvyyssantureita puolestaan korin pystysuuntaisten liikkeiden mittaamiseen. Mittaustiedoista voidaan laatia tien pituussuuntainen profiili. PTM -auton mittaama profiili ei kuitenkaan kuvaa tien todellista profiilia, vaan on tien tasaisuusprofiili, jossa yli 30 metrin aallonpituudet on suodatettu pois. (Onninen 2001.)

Mittaustiedoista lasketaan erilaisia tien pinnan laatua kuvaavia tunnuslukuja. Yleisimmin käytettyjä tunnuslukuja ovat pituus- ja poikkisuuntaista tasaisuutta kuvaajat parametrit, karkeutta kuvaajat parametrit sekä geometriaa kuvaajat parametrit (Tiehallinto 2005). Tutkimusta varten mitattiin parametreja, jotka kuvaavat levitystyön laatua. Näitä parametreja olivat IRI- ja IRI4 -arvot, megakarkeus, maksimiurasyvyys sekä Mean Profile Depth (MPD).

IRI -arvon (International Roughness Index) avulla kuvataan sellaista epätasaisuutta, jonka autoilija tuntee epämukavana. Epätasaisuudet, joiden aallonpituus on 0,5-30 m, vaikuttavat IRI -arvoon. IRI4 -arvoon puolestaan vaikuttavat aallonpituudeltaan 0,5-4 m epätasaisuudet ja IRI4 -arvo onkin laadittu kuvaamaan päällysteen levitystyön laatua. (Onninen 2001.)

Lasermittauksen avulla voidaan määritellä päällysteen karkeutta luokiteltuna makro- ja megakarkeuteen. Megakarkeuden avulla voidaan kuvata tien pinnan lyhytaaltoista epätasaisuutta. Tällaista epätasaisuutta voivat aiheuttaa esimerkiksi levitystyön aikaiset työvirheet tai päällysteen purkaumat. (Onninen 2001.) Makrokarkeuden kuvaamiseen on käytössä kaksi tunnuslukua, jotka ovat profiilin keskisyvyys, MPD, ja profiilin tehollinen syvyys, RMS (Liikennevirasto 2010).

MPD (Mean Profile Depth) on ISO -standardin 13473-1 mukaan määritelty karkeusparametri, joka mitataan yleensä jatkuvana molemmista ajourista sekä ajourien välistä. Makrokarkeuden mittauksessa tuotetaan pituussuuntainen profiili 100 mm jaksoissa. Ensin aineisto suodatetaan ja kaltevuuskorjataan ja tämän jälkeen pituusprofiili jaetaan kahteen osaan. Näille osille määritetään huipun ja regressiolla saadun keskitason välinen etäisyys. Saatu tunnusluku kuvaa profiilin keskisyvyyttä. Laskentaperiaate on esitetty kuvassa 26. MPD on kaksiulotteinen mitta ja se lasketaan alueelta, joka vastaa autonrenkaan ja tienpinnan kosketusala. MPD kuvaa keskimääräistä makrokarkeutta ja sen on havaittu vastaavan hyvin RMS -makrokarkeuden tuloksia. (Tiehallinto 2005, Liikennevirasto 2010.)



Kuva 26. MPD:n laskentaperiaate (Liikennevirasto 2010).

Mittaukset tehtiin jokaisella koekohteella ajamalla PTM -autolla jokainen kaista kertaalleen läpi. Saadusta mittausdatasta laskettiin 1 m ja 100 m tunnuslukujen keskiarvot, joiden avulla tarkasteltiin korreloivatko lämpökameralla havaitut kylmemmät kohdat PTM -mittauksista saatujen parametrien kanssa.

4.1.4 Haastattelututkimus

Tutkimusta varten tehtiin haastattelututkimus urakoitsijoille, jonka tarkoituksena oli selvittää urakoitsijoiden kokemuksia lämpökameran käytöstä työn aikana. Urakoitsijoiden edustajille lähetettiin kyselylomake sähköpostitse, johon urakoitsijat vastasivat kirjallisesti. Kyselylomake on esitetty liitteessä 2. Lomakkeen avulla kysyttiin urakoitsijoiden mielipiteitä ja kokemuksia koskien lämpökameralaitteistoa ja sen käyttöä, bonuslaskentajärjestelmää sekä lämpökameran vaikutuksia omaan työskentelyyn.

4.2 Laboratoriotutkimukset

Seuraavissa kappaleissa on esitetty lyhyesti laboratoriomittauksissa käytetyt menetelmät sekä menetelmien periaatteet. Laboratoriotutkimus suoritettiin pääasiassa Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun tietekniikan laboratoriossa Espoon Otaniemessä. Bitumin uutot tehtiin Destia Oy:n toimesta. Tutkimuksessa oli mukana vakituisen henkilökunnan lisäksi tietekniikan laboratoriossa kesällä 2013 työskennelleitä opiskelijoita.

4.2.1 Kappaletiheysten määrittäminen

Kappaletiheys määritettiin eurooppalaisen standardin SFS-EN 12697-6 menettelyllä A, jolla määritetään asfalttinäytteen kappaletiheys kuiva-menetelmällä. Testimenetelmä on tarkoitettu laboratoriossa tiivistettyjen tai valmiista päällysteestä otettujen poranäytteiden tutkimiseen. Asfalttinäytteen kappaletiheydellä tarkoitetaan näytteen massan ja tilavuuden suhdetta tunnetussa testilämpötilassa huokoset mukaan lukien. Kappaletiheys määritetään näytteen massan ja tilavuuden avulla. Näytteiden tulee olla puhtaita ja kuivia ennen kappaletiheysten määrittämistä. (SFS-käsikirja 2004.)

Valtateiltä 1 ja 3 otetut poranäytteen olivat lähes puhtaita ja niiden esikäsittelyksi riitti näytekappaleen puhdistaminen harjaamalla irtolika pois. Valtatieltä 4 otetut poranäyt-

teet sen sijaan jouduttiin pesemään ja tämän jälkeen kuivaamaan uunissa, sillä näytteidⁿ pinnalle oli porauksessa kerääntynyt suuri määrä likaa. Tämä johtui näytteidⁿ oton ajankohdasta, sillä näytteet otettiin pian päällystystyön jälkeen, jolloin sideaineeseen tarttui helposti likaa.

Koe suoritettiin punnitsemalla kuivattu näyte ilmassa. Tämän jälkeen näyte punnittiin vedessä ripustamalla se vesihauteessa olevaan ripustimeen. Vaa'an lukema merkittiin ylös mahdollisimman nopeasti, jottei vesi ehdi imeytyä näytteen huokosiin. (SFS-käsikirja 2004.) Alla on esitetty laskentakaava (1) kappaleitiheyden määrittämiseksi kuiva-menetelmällä:

$$\rho_{bdry} = \frac{m_1}{(m_1 - m_2)} \times \rho_w \quad (1)$$

missä

ρ_{bdry} on asfalttinäytteen kappaleitiheys - kuiva, [kg/m³]
 m_1 kuivan näytteen massa ilmassa, [g]
 m_2 näytteen massa vedessä, [g]
 ρ_w veden tiheys testilämpötilassa, [kg/m³]
 (SFS-käsikirja 2004.)

4.2.2 Massan maksimitiheyden määrittäminen

Asfalttimassan maksimitiheys määritettiin standardin SFS-EN 12967-5 mukaisesti käyttämällä menettelyä B eli hydrostaattista menettelyä. Asfalttimassan maksimitiheydellä kuvataan asfalttimassan ja sen tilavuuden suhdetta tunnetussa testilämpötilassa, kun huokosia ei oteta huomioon. (SFS-käsikirja 2004.)

Kuivat ja puhdistetut näytteet lämmitettiin uunissa, minkä jälkeen ne hajotettiin ja eroteltiin karkeisiin rakeisiin ja hienoainepaakkuihin. Tämän jälkeen määritettiin tyhjän astian massa ilmassa ja vedessä. Massa lisättiin astiaan ja punnittiin ilmassa. Astia täytettiin vedellä, minkä jälkeen massasta poistettiin ilma täryttämällä tyhjiössä. Kun massasta oli poistettu ilma, määritettiin astian massa lisätynä veteen upotetun testinäytteen massalla. (SFS-käsikirja 2004.) Laskentakaava (2) on esitetty ohessa:

$$\rho_{mh} = \frac{m_3 - m_1}{(m_3 - m_1) - (m_4 - m_2)} \times \rho_w \quad (2)$$

missä

ρ_{mh} on asfalttimassan maksimitiheys määriteltynä hydrostaattisella menettelyllä, [kg/m³]
 m_1 astian massa ilmassa, [g]
 m_2 astian massa vedessä, [g]
 m_3 astian massa lisätynä testinäytteen massalla ilmassa, [g]
 m_4 astian massa ja testinäytteen massa veteen upotettuna, [g]
 ρ_w veden tiheys testilämpötilassa, [kg/m³]
 (SFS-käsikirja 2004.)

4.2.3 Tyhjätilan määrittäminen

Asfalttinäytteiden tyhjätila määritettiin standardin SFS-EN 12967-8 mukaisesti. Tyhjätilalla tarkoitetaan tiivistetyn asfalttinäytteen bitumipäällysteisten kivirakeiden välistä tilaa, joka on täyttynyt ilmalla. Asfalttinäytteen tyhjätilapitoisuuden laskemisessa käytetään tietoa asfalttimassan maksimitiheydestä sekä asfalttinäytteen kappaleitiheydestä. (SFS-käsikirja 2004.) Laskennassa käytetty kaava (3) on esitetty alla:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100\% \quad (3)$$

jossa

V_m on massan tyhjätilapitoisuus, [%]

ρ_m asfalttimassan maksimitiheys, [kg/m^3]

ρ_b asfalttinäytteen kappaleitiheys, [kg/m^3]

(SFS-käsikirja 2004.)

4.2.4 Sideainepitoisuuden määrittäminen

Sideainepitoisuus määritettiin pääosin Aalto-yliopiston Insinöörیتieteiden korkeakoulun tietekniikan laboratoriossa. Osa valteiden 1 ja 3 näytteistä tutkittiin Destia Oy:n laboratoriossa.

Tietekniikan laboratoriossa sideainepitoisuuden määrittämiseen käytettiin uutusuodatuslaitteistoa (kuva 27). Maksimitiheyden määrittämisen jälkeen massa asetettiin laitteiston seulasarjastoon, jossa massasta uutettiin sideaine. Uutettu sideaine kerättiin talteen.



Kuva 27. Uutusuodatuslaitteisto (Nevalainen 2013).

4.2.5 Rakeisuuden määrittäminen

Kiviaineksen rakeisuus määritettiin sideaineen uuttamisen jälkeen. Raekokojakauma määritettiin standardin SFS-EN 12697-2 mukaisesti kuivaseulontana. Kuivattu kiviaines asetettiin seulasarjastoon, minkä jälkeen sarjastoa tärytettiin. Seuloille jäänyt kiviaines punnittiin ja tuloksista laskettiin jokaisen seulan läpäisyprosentti.

4.2.6 Halkaisuvetolujuus

Osana laboratoriotutkimusta tehtiin myös päällysteen lujuusominaisuuksien tarkastelu. Halkaisuvetolujuus määritettiin standardin SFS-EN 12697-23 mukaisesti kahdeksalta näytteeltä kohteittain. Halkaisuvetolujuus (ITS, indirect tensile strength) kuvaa päällysteen maksimivetojännitystä murtotilaan asti kohdistettuna (SFS-käsikirja 2004.).

Sylinterinmuotoinen poranäyte temperoitiin 10 °C testilämpötilaan, minkä jälkeen näyte asetettiin puristustestilaitteeseen kuormituspalkkien väliin. Näytettä kuormitettiin halkaisijan suunnassa vakiosiirtymänopeudella murtumiseen saakka sylinterin akselin kohdalta. Halkaisuvetolujuus määritettiin murtotilan kuormitushuipun sekä näytteen mittojen perusteella. (SFS-käsikirja 2004.) Ohessa on esitetty halkaisuvetolujuuden laskennassa käytetty yhtälö (4):

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (4)$$

jossa

ITS on halkaisuvetolujuus ilmoitettuna gigapascaleina, [GPa]
P huippukuormitus ilmoitettuna kilonewtoneina, [kN]
D näytteen halkaisija ilmoitettuna millimetreinä, [mm]
H näytteen korkeus ilmoitettuna millimetreinä, [mm]
(SFS-käsikirja 2004.)

4.2.7 Jäykkyys

Kuten halkaisuvetolujuuden määrittämisessä, myös jäykkyyden määrittämisessä mittaukset tehtiin kahdeksalta näytteeltä kohteittain. Päällysteen jäykkyys määritettiin poranäytteistä standardin SFS-EN 12697-26 mukaisella menettelyllä.

Menetelmän periaatteena on, että näyte deformoituu lineaariselta alueeltaan, kun se altistuu toistuvaan kuormitukseen. Testin voi tehdä erilaisilla standardin mukaisilla menettelyillä. Tutkimuksessa jäykkyyden määrittämiseen käytettiin epäsuoraa vetolujuustestiä, joka suoritettiin testiin soveltuvalla laitteistolla 10 °C testilämpötilassa. Laitteiston muodonmuutosta mittaavien antureiden avulla tietokone laskee kappaleen jäykkyyden ja antaa arvon megapascaleina (MPa). (SFS-käsikirja 2006.)

5 Tutkimustulokset

Seuraavissa kappaleissa on esitetty tutkimustulokset lämpökameramittausten, laboratorio-kokeiden sekä PTM -mittausten osalta. Tutkimustulosten tarkastelu on esitetty kohdassa 6. Lisäksi liitteessä 3 on esitetty poranäytteiden ottokohdat, liitteessä 4 seulonnan tulokset ja liitteessä 5 laskennalliset päällysteen tilavuussuhteet.

5.1 Lämpökameratulokset

Päällysteen pintalämpötilaa mitattiin jokaisella kohteella koko urakan ajan levittimeen kiinnitetyllä lämpökameralla. Alla olevassa taulukossa (taulukko 4) on esitetty kohteiden keskilämpötilat. Aineistosta on poistettu 30 cm kaistan molemmilta reunoilta sekä alle 80 °C lämpötilapisteet, sillä nämä pisteet voidaan tulkita jyrän tai ihmisten aiheuttamiksi, eivätkä täten edusta päällysteen pinnan lämpötilaa.

Taulukko 4. Kohteiden keskilämpötilat.

Kohde	Mittaus pvm	Pituus (m)	Lämpötilan keskiarvo (°C)
VT1 111 26/2468–27/4010	28.5.–3.6.2013	8287	158,5
VT1 112 26/2468–27/4010	27.5.–3.6.2013	8287	157,2
VT1 221 26/2530–27/4000	16.5.–22.5.2013	8215	157,0
VT1 222 26/2530–27/4000	15.5.–23.5.2013	8215	158,4
VT3 111 136/0–137/1100	19.8.2013	8840	154,3
VT3 112 136/0–137/1050	18.8.–22.8.2013	8790	153,7
VT3 221 136/0–137/1050	6.8.2013	8790	150,8
VT3 222 136/0–137/1050	5.8.2013	8790	153,6
VT3 111 139/610–139/5850	30.7.–31.7.2013	5240	153,0
VT3 112 139/610–139/5850	29.7.–30.7.2013	5240	150,0
VT3 221 139/610–139/5850	24.7.2013	5240	153,3
VT3 222 139/610–139/5850	24.7.–29.7.2013	5240	151,5
VT4 111 364/2710–364/8850	2.7.2013	6140	157,4
VT4 112 364/2710–364/8850	1.7.–11.7.2013	6140	154,3
VT4 221 364/2715–364/4300	25.6.–26.6.2013	1585	156,5
VT4 222 364/2715–364/4300	24.6.–25.6.2013	1585	156,9

Lämpökameradataa tarkasteltiin sekä visuaalisessa muodossa lämpötilamattoina että raakadatana numeerisessa muodossa. Roadscanners Oy:n web-palvelun tarjoamat lämpötilamatot oli sidottu yhteen tierekisteriosoitteen kanssa, jolloin näytekohtien sijainti voitiin merkitä lämpötilamattoon. Näytekohtien sijainnit on esitetty liitteessä 3.

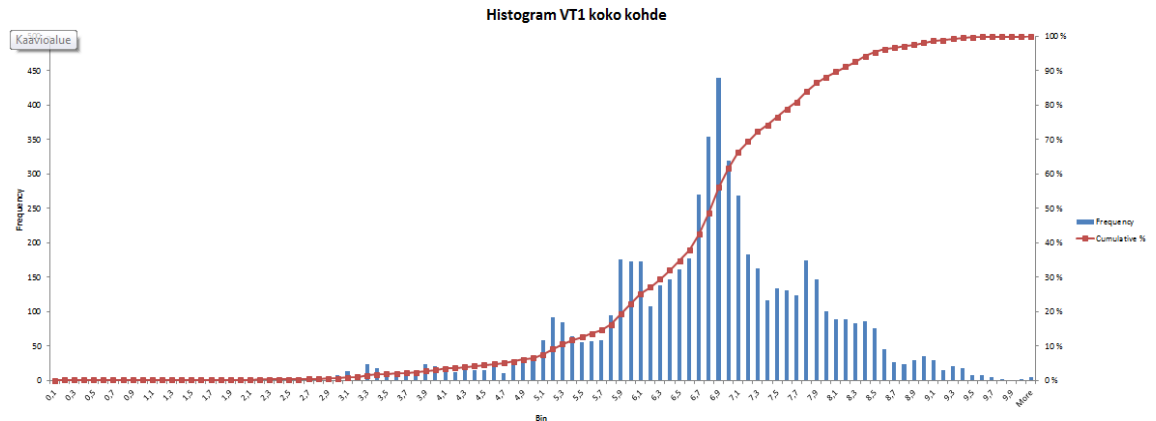
Päällysteen lämpötila näytteenottokohdista määritettiin Matlab -ohjelmistolla. Ohjelmaan syötettiin lämpökameran tuottama lämpötilatieto taulukkomuodossa, josta ohjelma tulosti lämpötilamaton. Koska näytteenotto kohtien määrittäminen tarkasti lämpötilamatosta on hankalaa, lämpötilamatosta rajattiin noin 1x1 metrin alue poranäytteen ottokohdalta ja laskettiin ohjelman avulla tämän alueen lämpötilan keskiarvo. Alueen keskilämpötila edustaa päällysteen lämpötilaa yhden poranäytteen kohdalla. Taulukossa

5 on esitetty Matlab -ohjelmistolla määritetyt lämpötilat poranäytteiden kohdilta. Harmaalla pohjalla olevat arvot on mitattu kuormanvaihdosta.

Taulukko 5. Päällysteen lämpötila määritettynä poranäytteiden kohdalta. Kuormanvaihdot on esitetty harmaalla.

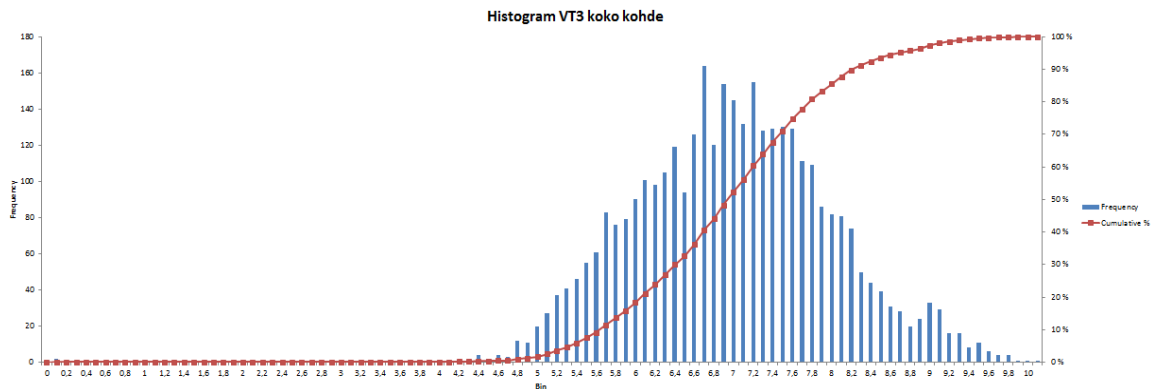
Näyte nro.	Lämpötila (°C)		
	VT1	VT3	VT4
1	153,8	145,5	135,6
2	167,8	155,5	127,5
3	163,8	159,4	129,0
4	157,5	151,9	129,9
5	146,9	151,1	143,0
6	159,4	159,2	151,2
7	154,4	162,6	148,9
8	143,6	155,6	146,6
9	154,8	153,8	134,6
10	166,3	158,4	139,8
11	161,1	161,5	150,9
12	153,5	154,2	140,1
13	141,0	146,2	150,9
14	143,4	143,4	151,8
15	132,3	149,0	149,7
16	143,5	147,9	151,4
17	145,6	156,2	154,4
18	142,5	159,6	155,7
19	156,6	161,9	155,4
20	149,7	157,3	153,8
21	166,9	144,0	148,1
22	173,8	147,2	150,7
23	170,6	154,6	134,1
24	169,1	150,4	141,3
25	161,0	151,7	151,7
26	161,3	153,8	156,1
27	162,0	158,4	153,5
28	168,4	154,5	154,4
29	171,3	141,7	144,3
30	176,4	152,9	140,3
31	171,9	158,8	146,1
32	174,9	151,6	137,7

Lämpökameramittauksiin sisältyi myös levittimen nopeuden mittaus. Levittimen nopeutta mitattiin pulssianturin avulla. Seuraavissa kuvissa (kuvat 28 -30) on esitetty nopeuden vaihtelu kohteittain.



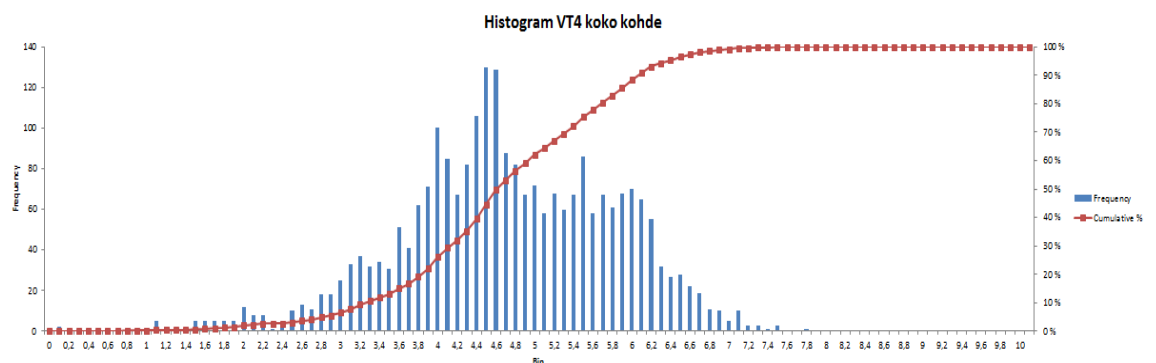
Kuva 28. Levittimen nopeuden vaihtelu kohteella VT1.

Kohteella VT1 levitysnopeuden keskiarvo oli 6,8 metriä minuutissa ja vaihteluväli oli 0-10,3 m/min.



Kuva 29. Levittimen nopeuden vaihtelu kohteella VT3.

Kohteella VT3 levitysnopeuden keskiarvo oli 7,0 m/min ja vaihteluväli oli 0-10,1 m/min.



Kuva 30. Levittimen nopeuden vaihtelu kohteella VT4.

Kohteella VT4 levitysnopeuden keskiarvo oli 4,6 m/min ja vaihteluväli oli 0-7,8 m/min.

Urakoista maksettavaa bonusta varten jokaiselta kohteelta laskettiin lämpökameralaitteiston datan perusteella pysähdysten määrä, kylmien alueiden osuus sekä riskialueiden osuus. Pysähdysten osalta otettiin huomioon yli 2 min kestäneet pysähdykset. Kylmät alueet koostuivat alle 120 °C lämpötilapisteistä. Vastaavasti riskialueiksi laskettiin alueet, joissa lämpötila oli alle 90 % edellisen 100 metrin keskiarvolämpötilasta. Lasken-

nassa jätettiin huomiotta 30 cm kaistan molemmilta reunoilta sekä alle 80 °C lämpötilapisteet. Bonuslaskenta tehtiin jakamalla kohde kilometrin pituisiin jaksoihin. Oheisessa taulukossa (taulukko 6) on esitetty bonuslaskennan tulokset jokaiselta kohteelta. Tulokset ovat koko kohteen keskiarvoja.

Taulukko 6. Bonustarkastelun tunnusluvut kohteittain.

	VT1	VT3	VT4
Pysähdykset (kpl / km)	0,4	1,0	0,7
Kylmät alueet (% / km)	0,49	1,20	0,41
Riskialueet (% / km)	7,67	4,94	5,54

5.2 Laboratoriotulokset

Kaikista tieltä otetuista poranäytteistä tutkittiin laboratoriossa päällysteen kappaleitiheys, massan maksimitiheys, päällysteen tyhjätila, sideainepitoisuus sekä rakeisuus. Alla olevissa taulukoissa on esitetty laboratoriotulokset kohteittain kappaleitiheyden, massan maksimitiheyden, päällysteen tyhjätilan, sideainepitoisuuden sekä 0,063 mm seulan läpäisyn osalta (taulukot 7-9). Kaikki seulonnan tulokset on esitetty liitteessä 4.

Taulukko 7. Poranäytteiden tutkimustulokset, kohde vt1.

VT1 Näyte nro.	Kappaleitiheys (Mg/m³)	Maksimitiheys (Mg/m³)	Tyhjätila (til.- %)	Sideaine- pitoisuus (massa- %)	0,063 mm seulan läpäisy (%)
1	2,396	2,437	1,7	6,0	9,5
2	2,400	2,437	1,5	5,9	9,6
3	2,392	2,424	1,3	5,8	9,5
4	2,372	2,458	3,5	5,4	9,0
5	2,391	2,444	2,2	5,9	8,9
6	2,385	2,452	2,8	5,5	8,8
7	2,356	2,435	3,2	6,0	9,7
8	2,377	2,444	2,7	4,7	9,0
9	2,387	2,438	2,1	6,0	9,2
10	2,413	2,446	1,4	5,8	8,9
11	2,389	2,427	1,6	6,3	9,5
12	2,379	2,438	2,4	5,9	9,5
13	2,393	2,430	1,5	6,1	10,6
14	2,425	2,449	1,0	5,7	9,8
15	2,397	2,437	1,6	6,0	10,1
16	2,357	2,446	3,7	5,6	10,0
17	2,375	2,442	2,7	6,0	10,8
18	2,401	2,440	1,6	6,2	10,7
19	2,430	2,452	0,9	5,8	10,4
20	2,382	2,442	2,4	6,0	10,5
21	2,405	2,440	1,4	6,0	11,0
22	2,411	2,441	1,3	6,0	10,6
23	2,411	2,443	1,3	5,9	11,8
24	2,392	2,441	2,0	6,3	11,5
25	2,404	2,451	1,9	5,9	11,3
26	2,432	2,414	-0,7	6,6	12,1
27	2,425	2,443	0,8	6,2	11,8
28	2,406	2,442	1,5	6,0	11,3
29	2,413	2,431	0,8	6,2	11,7
30	2,452	2,423	-1,2	6,5	11,9
31	2,430	2,428	-0,1	6,3	12,3
32	2,383	2,440	2,4	6,1	11,5

Valtatien 1 näytetutkimuksissa saatiin kolmen näytteen tyhjätilaksi negatiivinen arvo. Kyseiset tulokset jätettiin pois tarkastelusta virheellisen arvon vuoksi. Tyhjätilan keskiarvoksi saatiin 1,9 % ja sideainepitoisuuden keskiarvoksi 5,7 %. Vain kolme poranäytteistä laskettua tyhjätilan arvoa ylitti 3 %. Suurin laskettu arvo oli 3,7 %. Sideainepitoisuus puolestaan vaihteli 4,7–6,6 % välillä. Kohteen suunniteltu sideainepitoisuuden ohjearvo oli 6,3 % ja urakoitsijan massanäytteistä tutkima toteutunut sideainepitoisuus oli 6,1 %.

Taulukko 8. Poranäytteiden tutkimustulokset, kohde vt3.

VT3 Näyte nro.	Kappaletiheys (Mg/m ³)	Maksimitiheys (Mg/m ³)	Tyhjätila (til.- %)	Sideaine- pitoisuus (massa- %)	0,063 mm seulan läpäisy (%)
1	2,404	2,548	5,6	5,2	12,7
2	2,442	2,535	3,7	5,4	12,4
3	2,458	2,534	3,0	5,5	12,8
4	2,470	2,534	3,0	5,6	12,6
5	2,452	2,547	3,7	5,2	11,7
6	2,464	2,531	2,7	5,6	12,6
7	2,480	2,664	6,9	5,8	13,0
8	2,410	2,520	4,4	5,8	11,4
9	2,413	2,538	4,9	5,0	11,6
10	2,461	2,530	2,7	5,7	11,4
11	2,475	2,527	2,0	5,6	12,7
12	2,423	2,533	4,3	5,6	12,4
13	2,399	2,538	5,5	5,3	10,8
14	2,432	2,543	4,3	5,4	11,3
15	2,483	2,513	1,2	6,0	12,1
16	2,403	2,532	5,1	5,7	11,1
17	2,444	2,531	3,5	5,4	11,9
18	2,462	2,532	2,7	5,5	11,9
19	2,430	2,538	4,2	5,4	11,2
20	2,369	2,531	6,4	5,5	11,3
21	2,462	2,522	2,4	6,0	11,6
22	2,455	2,531	3,0	5,5	11,9
23	2,484	2,520	1,4	5,7	12,0
24	2,390	2,544	6,1	5,0	11,8
25	2,429	2,520	3,6	5,6	12,6
26	2,437	2,519	3,2	5,8	11,6
27	2,469	2,509	1,6	6,5	11,7
28	2,412	2,521	4,3	5,9	12,2
29	2,418	2,540	4,8	5,2	11,5
30	2,424	2,541	4,6	5,3	12,0
31	2,475	2,505	1,2	6,1	12,2
32	2,368	2,531	6,4	5,6	11,8

Valtatie 3:n kohteella tyhjätilan keskiarvoksi poranäytetutkimuksessa saatiin 3,8 % ja sideainepitoisuuden keskiarvoksi 5,6 %. Suurimmat lasketut tyhjätilan arvot olivat 6,4–6,9 %. Poranäytteistä mitattu sideainepitoisuus vaihteli 5,0–6,5 % välillä, kun taas kohteen suunniteltu sideainepitoisuuden ohjearvo oli 5,9 % ja urakoitsijan massanäytteistä tutkima toteutunut sideainepitoisuus puolestaan 5,8 %.

Taulukko 9. Poranäytteiden tutkimustulokset, kohde vt4.

VT4 Näyte nro.	Kappaletiheys (Mg/m ³)	Maksimitiheys (Mg/m ³)	Tyhjätila (til.- %)	Sideaine- pitoisuus (massa- %)	0,063 mm seulan läpäisy (%)
1	2,587	2,743	5,7	5,1	11,3
2	2,529	2,735	7,5	5,3	12,0
3	2,535	2,728	7,1	5,4	12,0
4	2,589	2,764	6,3	5,1	11,5
5	2,576	2,724	5,4	5,0	11,9
6	2,577	2,727	5,5	5,1	11,9
7	2,615	2,727	4,1	5,9	12,3
8	2,556	2,731	6,4	5,2	11,9
9	2,617	2,696	2,9	5,8	12,8
10	2,613	2,738	4,6	5,5	12,5
11	2,566	2,752	6,8	5,5	11,8
12	2,535	2,754	8,0	5,1	11,4
13	2,568	2,706	5,1	5,5	12,4
14	2,720	2,754	1,2	5,4	12,1
15	2,704	2,731	1,0	4,4	8,3
16	2,708	2,749	1,5	5,1	11,2
17	2,694	2,682	-0,5	6,2	13,3
18	2,742	2,745	0,1	5,5	12,3
19	2,703	2,727	0,9	5,4	12,3
20	2,661	2,711	1,8	6,0	13,0
21	2,659	2,748	3,3	5,5	12,0
22	2,648	2,747	3,6	5,4	12,1
23	2,732	2,748	0,6	5,5	12,3
24	2,685	2,760	2,7	4,7	10,8
25	2,714	2,741	1,0	5,5	12,1
26	2,782	2,741	-1,5	5,3	12,3
27	2,705	2,781	2,7	6,4	10,2
28	2,704	2,759	2,0	5,2	12,6
29	2,660	2,821	5,7	6,0	11,5
30	2,656	2,851	6,8	5,1	11,7
31	2,682	2,768	3,1	5,4	11,7
32	2,713	2,779	2,4	5,1	12,7

Valtatie 4:n suunniteltu sideainepitoisuuden ohjearvo oli 5,3 % ja urakoitsijan massa-näytteistä tutkima toteutunut sideainepitoisuus niin ikään 5,3 %. Poranäytteiden si-deainepitoisuuden keskiarvoksi saatiin 5,4 %. Sideainepitoisuus vaihteli 4,4–6,4 % vä-lillä. Tyhjätilan keskiarvoksi poranäytetutkimuksessa saatiin 3,9 %. Suurimmat pora-näytteistä lasketut tyhjätilat olivat noin 7 % ja maksimiarvo 8,0 %. Massassa käytettiin OKTO-mursketta ja kohteella mitattiin korkeat arvot kiviaines-seoksen ominaispainolle (2,963 kg/m³). Korkean ominaispainon vuoksi päällysteen toteutunut paksuus oli tavoit-teltua alhaisempi. Porapaloista mitattu päällysteen paksuus oli 46,9 mm, kun tavoitteena oli laittaa 50 mm paksu laatta, joten massaa olisi pitänyt laittaa noin 130 kg/m² laitetun 120 kg/m² asemasta.

Myös valtatie 4 näytteiden määrittämisessä tyhjätilan arvo oli negatiivinen kahden näyt-teen osalta. Nämä näytteet jätettiin pois tarkastelusta. Syyksi virheelliseen tyhjätilan määrittämiseen epäillään porauksen ajankohtaa vain muutama tunti päällystyksen jälkeen. Sää päällystysaika oli sateinen ja muutamista poranäytteistä löytyikin vettä uu-nikuivatuksen jälkeen, sillä porauksen yhteydessä tuore sideaine sulki veden näytteen sisään.

Halkaisuvetolujuus sekä jäykkyys määritettiin 8 näytteestä jokaiselta kohteelta. Mittaus-lämpötila oli 10 °C. Alla olevaan taulukkoon (taulukko 10) on merkitty halkaisuvetolu-

juus- sekä jäykkyysmittausten tulokset. Osa mittauksista jouduttiin uusimaan, jotta saatiin näytteelle tulos, sillä joidenkin näytteiden asettelu telineeseen oli vaikeaa ja siksi saatiin liian poikkeavia tuloksia.

Taulukko 10. Halkaisuvetolujuus- ja jäykkyysmittausten tulokset.

Näyte	Halkaisuvetolujuus MPa	Jäykkyys MPa
VT1		
3	1,72	3760
7	1,81	2867
12	1,50	3955
16	1,97	2275
17	1,71	3956
21	2,38	2800
26	2,48	4488
30	2,41	4277
VT3		
4	2,16	5352
8	1,69	3745
11	1,97	4357
15	1,83	4020
18	2,19	5843
22	2,14	5578
25	1,74	4114
29	1,90	4189
VT4		
3	1,57	2567
7	1,74	2819
9	1,91	3835
13	1,65	3282
18	1,89	2820
22	1,45	2376
28	1,43	3292
32	1,27	2455

Jokaiselta kohteelta laskettiin myös näytteiden tilavuussuhteet, jotka on esitetty liitteessä 5. Valtatie 4:n kohteelta laskettiin myös bitumin absorptio kiviainekseen, sillä kohteella käytettiin OKTO -mursketta. Bitumin absorptio huokoiseen OKTO -murskeeseen oli keskimäärin 0,38 %, mutta lasketut arvot vaihtelivat 0,12–1,2 %, ollen paikoin korkeita (liite 5). Liitteessä tilavuussuhteet on laskettu käyttäen apuna laboratoriomittauksista saatuja tuloksia sekä matemaattisia kaavoja (Doré & Zubeck 2009).

5.3 PTM -mittaustulokset

Oheisessa taulukossa (taulukko 11) on esitetty palvelutaso- eli PTM -mittausten tulokset IRI4 -arvon, maksimi urasyvyyden sekä MPD:n osalta. Taulukon tulokset on laskettu 1 m aineistosta. IRI4 sekä maksimi urasyvyys on mitattu oikean ajouran kohdalta. MPD puolestaan mitattiin kolmesta kohdasta, vasemmasta ajourasta, kaistan keskeltä sekä oikeasta ajourasta. Taulukossa on esitetty keskiarvo sekä keskihajonta.

Taulukko 11. PTM -mittaustulokset kaistoittain.

Kohde	IRI4		Max Ura		MPD vasen		MPD keski		MPD oikea	
	KA	KH	KA	KH	KA	KH	KA	KH	KA	KH
VT1 111 26/2600–27/4023	0,61	0,39	2,88	0,55	1,18	0,16	1,20	0,17	1,23	0,16
VT1 112 26/2600–27/4024	0,71	0,56	2,43	0,48	1,26	0,18	1,14	0,17	1,35	0,19
VT3 111 136/0–137/1058	0,69	0,38	2,50	0,54	1,34	0,16	1,16	0,16	1,19	0,17
VT3 111 139/616–139/5869	0,73	0,38	3,39	0,95	1,35	0,19	1,15	0,21	1,22	0,22
VT4 111 364/2711–364/8845	0,80	0,46	2,34	0,69	1,74	0,36	1,78	0,35	1,69	0,34

5.4 Haastattelututkimuksen tulokset

Lämpökameran käyttö sai sekä positiivista että negatiivista palautetta urakoitsijoilta. Suurimmat ongelmakohdat keskittyivät itse laitteistoon. Koska laitteisto oli irrotettava levittimestä aina työvuoron päätteeksi, jouduttiin johdot asentamaan pintavetona. Johdot olivat paikoin edessä ja hankaloittivat liikkumista levittimellä. Lisäksi laitteiston purkamisen ja asentaminen useita kertoja urakan aikana lisäsi työtaakkaa. Myös laitteiston sijoittamisessa havaittiin joitakin ongelmia. Laitteistoon kuuluneelle tietokoneelle oli kahdella kohteella vaikeaa löytää sopivaa asennuspaikkaa. Lisäksi yhdellä kohteella tietokoneen lämmönkestossa havaittiin ongelmia.

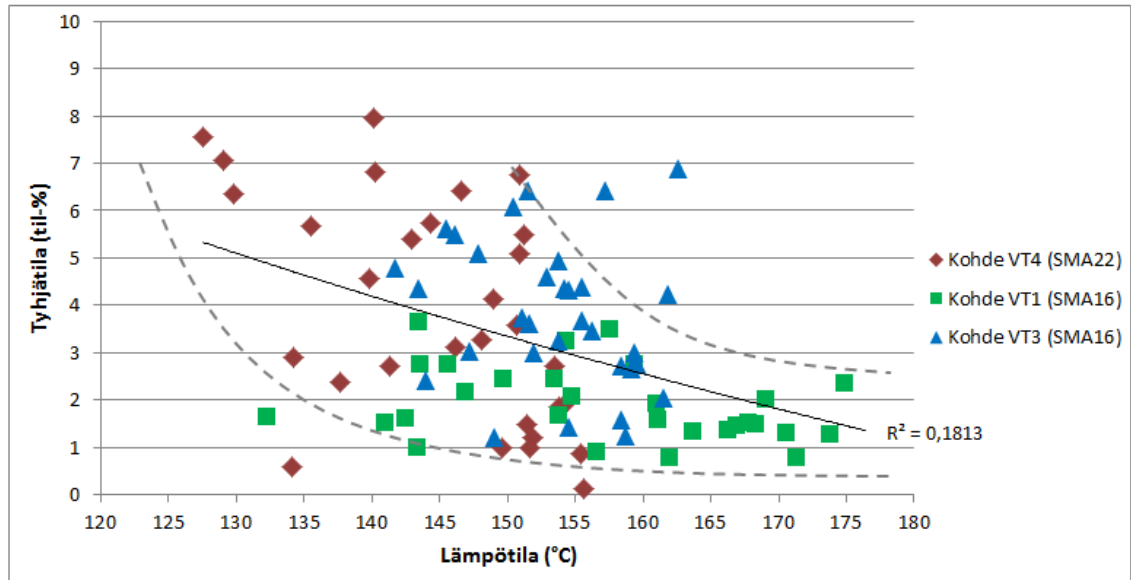
Urakoitsijat pyrkivät hyödyntämään laitteiston antamaa informaatiota oman työnsä kehittämiseksi ja mahdollisen bonuksen saavuttamiseksi. Urakoitsijoilta saatujen kommenttien mukaan työskentelytapoja muuteltiin, jotta kylmien alueiden muodostumista olisi saatu pienennettyä. Lämpökameran antama reaaliaikainen informaatio koettiin hyvänä lisänä omassa työssä, sillä työntekijöiden oli näytön avulla helppo hahmottaa kuormanvaihdossa syntyvät kylmemmät alueet. Lisäksi lämpötilamattoa pidettiin havainnollisena ja hyvänä esitystapana. Urakoitsijat olivat lisänneet kuorma-autojen määrää 1-2 kuorma-autolla, jotta levittimen pysähdykset saataisiin mahdollisimman vähäisiksi. Lisäksi levitin pyrittiin pitämään jatkuvasti liikkeellä levittimen nopeutta säätelemällä.

Negatiivista palautetta saivat bonuslaskelmissa käytetyt raja-arvot. Ainoastaan pysähdysten raja-arvoon oltiin tyytyväisiä. Nyt urakoitsijoille maksettiin bonusta lähes pelkästään pysähdysten osalta, sillä kylmien alueiden ja riskialueiden osalta raja-arvot ylittyivät lähes joka kohteella. Urakoitsijoiden mielestä raja-arvot oli asetettu liian tiukoiksi. Urakoitsijat toivoivat, että lämpökameran käytöstä maksettavat bonukset olisivat riittävän suuret, jotta mahdollisilla bonuksilla voitaisiin kattaa lämpökameralaitteistosta ja lisäkuljetuskalustosta koituvat lisäkustannukset.

Kaiken kaikkiaan urakoitsijoiden mielestä laitteiston kokoa tulisi pienentää ja asentamista helpottaa, jotta laitteisto olisi kätevämpi käyttää eikä lisäisi turhaa työtä. Myös etäisyyden mittaamiseen käytettyä mittapyörää oli hankala asentaa levittimeen. Urakoitsijat toivoivatkin, että jatkossa etäisyyden mittausta kehitettäisiin. Nykyinen bonuslaskentajärjestelmä soveltuu urakoitsijoiden mielestä parhaiten moottoritiekohteille, joissa on vähän rampeja tai liittymiä.

6 Tutkimustulosten tarkastelu

Kun tarkasteltiin kaikkien tutkimuskohteiden lämpötilan ja tyhjätilan välistä suhdetta (kuva 31), havaittiin lämpötilan ja tyhjätilan välillä samankaltainen yhteys kuin ruotsalaisissa tutkimuksissa on aiemmin havaittu.



Kuva 31. Lämpötilan ja tyhjätilan välinen korrelaatio, kaikki kohteet.

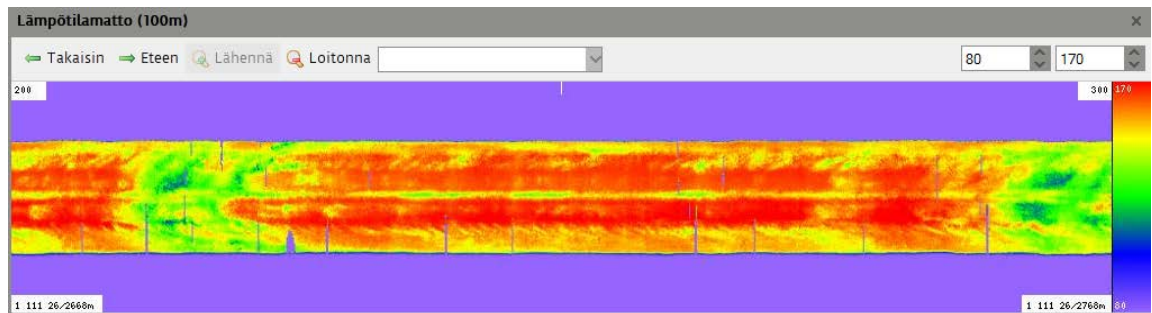
Korkeilla lämpötiloilla hajonta tyhjätiloissa pienenee ja tyhjätila on suhteellisen alhainen. Kun lämpötila laskee, tyhjätilan arvo alkaa kasvaa ja hajonta suurenee merkittävästi. Massan lajittuminen näkyy tuloksissa poikkeavina arvoina. Joillakin näytteillä havaittiin suuria tyhjätiloja, vaikka päällysteen lämpötila oli korkea. Suuret tyhjätilat johtuivat massalajittumisesta eli karkeasta kiviaineksesta ja alhaisesta sideainepitoisuudesta. Toisaalta taas tutkimuksessa havaittiin myös näytteitä, joilla tyhjätilat olivat erittäin alhaiset, vaikka lämpötila oli myös alhainen. Nämä tulokset selittyivät näytteiltä mitattuina suurina sideainepitoisuuksina ja korkeana hienoaineksen määränä, jolloin massa tiivistyi paremmin.

Poranäytteiden rakeisuutta kuvaavana tunnuslukuna eli niin sanottuna k-arvona (kts. kuva 1) tässä tutkimuksessa käytettiin jokaisen kohteen osalta 2 mm seulan läpäisyprosenttia. Sen havaittiin korreloivan parhaiten päällysteen sideainepitoisuuden kanssa. Sideainepitoisuuden sekä rakeisuutta kuvaavan k-arvon välisen korrelaation avulla voidaan arvioida massan lajittuneisuutta. Pellisen (1985) tutkimuksessa k-arvo oli laskettu neljän seulan keskiarvona.

Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan tutkimustuloksia kohteittain. Tarkastelun pääpainona oli tutkia päällysteen pintalämpötilan vaikutusta valmiin päällysteen ominaisuuksiin.

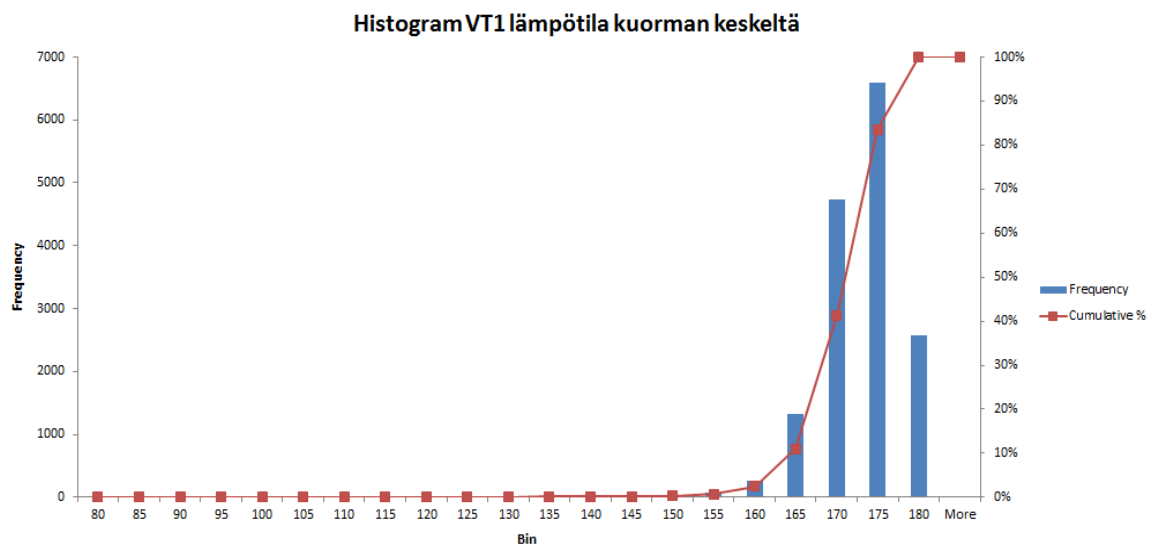
6.1 VT1 - Salo

Kohteella VT1 päällysteen lämpötilan keskiarvo koko kohteen osalta oli 157,8 °C, mikä oli tarkastelluista kohteista korkein. Lisäksi kohteella mitattiin korkeimmat yksittäiset lämpötila-arvot. Pitkä kuljetusmatka, noin 50 km, näkyi kuormanvaihtokohtien suuruudessa, sillä massa ehti jäähtyä kuljetuksen aikana. Kuvassa 32 on esimerkkikuva kohteen lämpötilamatosta, jossa havaitaan kuormanvaihtokohdat selvästi. Keskimääräinen lämpötilaero kuormanvaihtojen ja kuorman keskiosien välillä oli noin 18 °C. Jos yksittäisiä lämpötilapisteitä tarkastellaan, eroa oli paikoin jopa 60 °C.

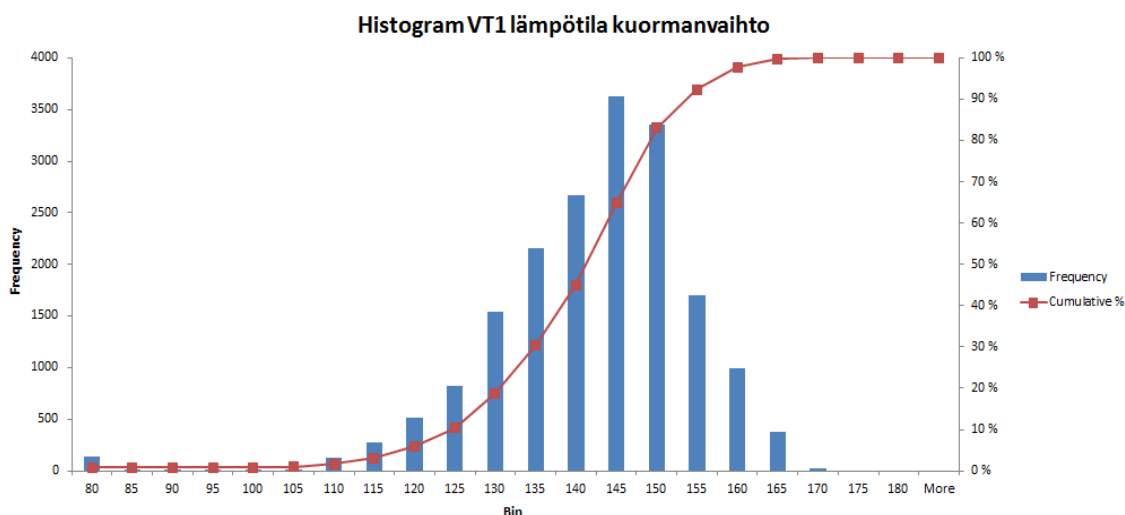


Kuva 32. VT1: Esimerkkikuva lämpötilamatosta (Roadscanners Oy 2014).

Lämpötilajakaumissa havaittiin suuria eroja kuormanvaihtojen ja kuorman keskiosien välillä. Keskeltä kuormaa mitattaessa lämpötila oli tasainen ja vaihtelu vähäistä, kuten lämpötilamattokin osoittaa. Kuvassa 33 on esitetty histogrammi lämpötilan jakautumisesta kuorman keskiosassa. Kyseisessä kohdassa lämpötilan keskiarvo on noin 171 °C. Kuvassa 34 on vastaavasti esitetty lämpötilan jakautuminen kuormanvaihtojen kohdalta. Histogrammista nähdään, että lämpötila vaihtelee laajasti 120–165 °C välillä, keskiarvo oli noin 142 °C.

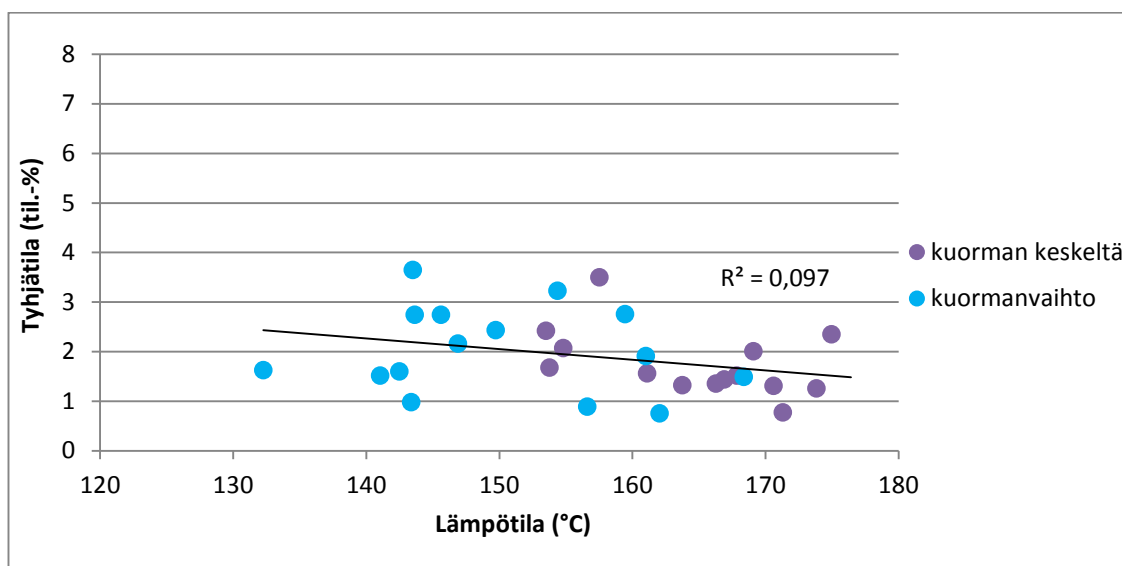


Kuva 33. VT1: Lämpötilan jakautuminen kuorman keskellä.



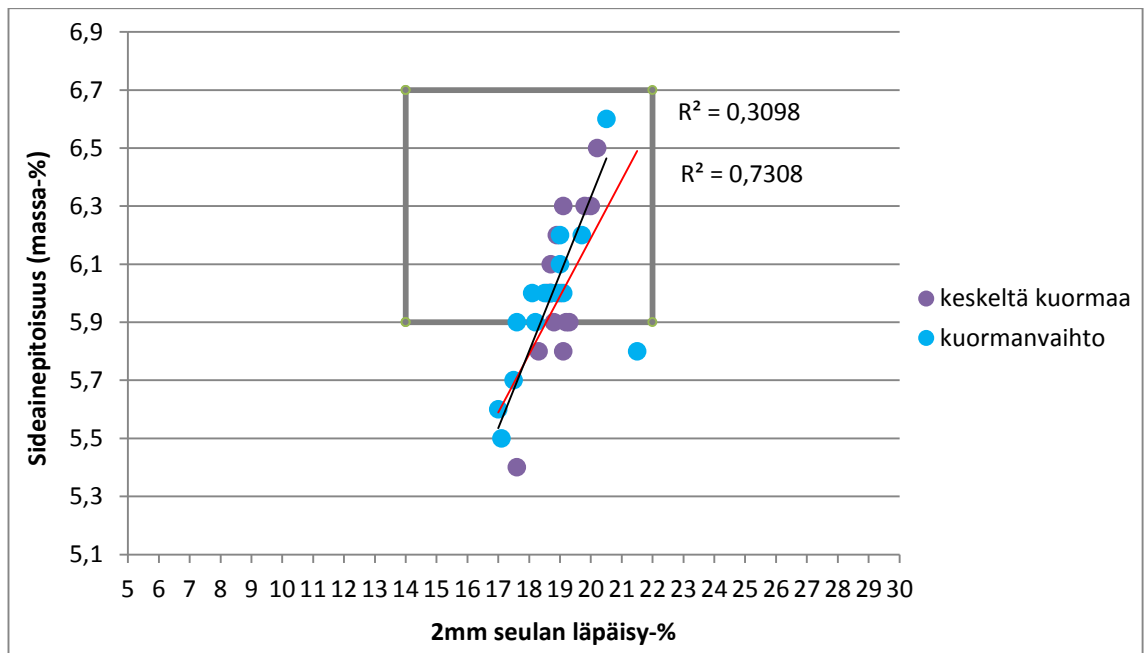
Kuva 34. VT1: Lämpötilan jakautuminen kuormanvaihdossa.

Päällysteen lämpötilan ja tyhjätilan välillä havaittiin heikko korrelaatio. Syitä olivat osittain korkeat lämpötilat sekä varsin alhainen tyhjätila. Korkeilla lämpötiloilla tyhjätilaerojen on havaittu tasoittuvan, kuten kuvasta 35 on selvästi nähtävissä.



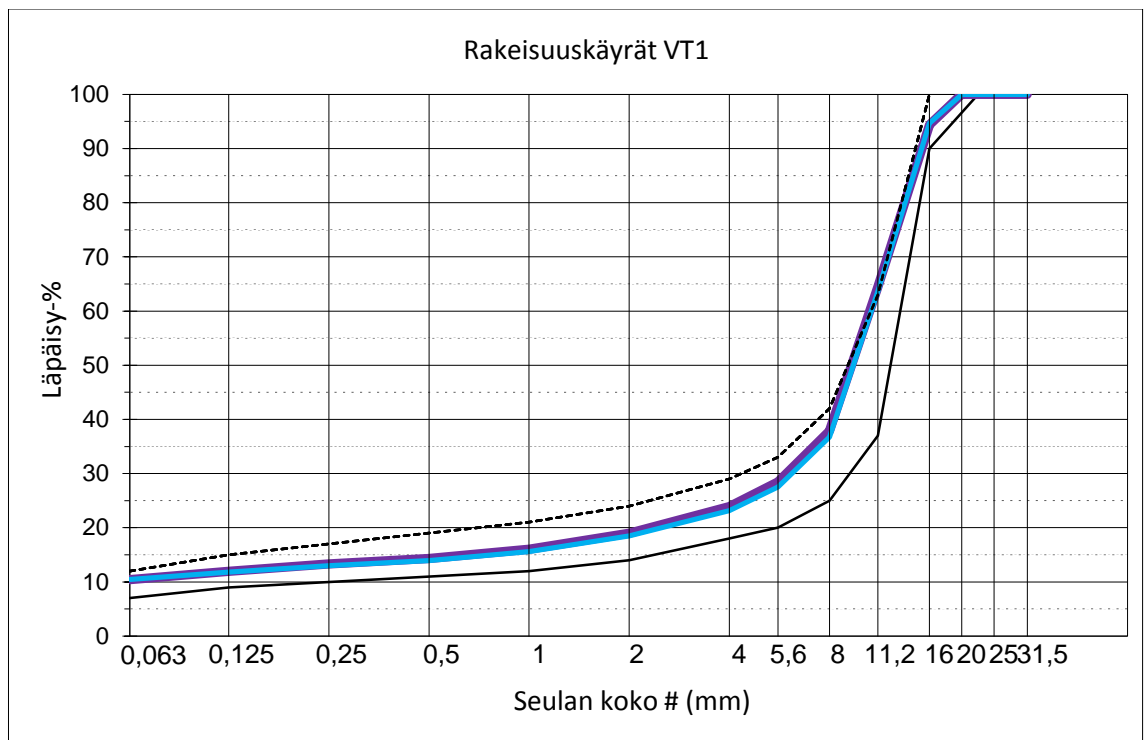
Kuva 35. VT1: Lämpötilan ja tyhjätilan välinen yhteys.

Kuormakatkon keskeltä otetuissa näytteissä tyhjätilat olivat yleensä kuormanvaihtoja alhaisemmat korkeamman lämpötilan sekä alhaisemman lajittumisen vuoksi. Kuormanvaihdossa kuorma-auton lavalla massa saattaa lajittua, jos massan pudotuskorkeus kuorma-auton lavalle on suuri tai jos kuljetukseen käytetään sopimatonta kalustoa. Lajittumien ehkäisemiseksi kuljetukseen on käytettävä massaa lajittamatonta kalustoa, kuten kuoppalavoja. Kuvassa 36 on esitetty rakeisuutta kuvaavan k-arvon eli tässä tapauksessa 2 mm seulan läpäisyprosentin sekä sideainepitoisuuden välinen yhteys. Kuvasta nähdään, että rakeisuuden ja sideainepitoisuuden välillä on lineaarinen korrelaatio, joka viittaa massalajittumaan. Etenkin kuormanvaihtojen osalta hajonta on suurta. Suhteutustietojen mukaan massan sideainepitoisuuden ohjearvo oli 6,3 % ja 2 mm rakeisuuden ohjearvo 18 %. Asfalttinormien mukaan sideainepitoisuuden sallittu hajonta on $\pm 0,4$ % ja 2 mm rakeisuudelle sallitaan ± 4 mm hajonta. Sallitut hajonnat on esitetty harmaalla viivalla kuvassa 36.



Kuva 36. VT1: Rakeisuuden ja sideainepitoisuuden välinen korrelaatio. Kuvassa on esitetty kaksi korrelaatiota. Punaisella esitetyistä korrelaatiosta on poistettu poikkeavat havainnot (näytteet 8 ja 19).

Tarkasteltaessa rakeisuuskäyriä havaittiin, ettei kuormanvaihtoista ja kuorman keskeltä otetuilla näytteillä ollut suuria eroja rakeisuuskäyrien muodossa. Kuorman vaihtoista otetuilla näytteillä rakeisuus oli hieman karkeampi. Kuvassa 37 on esitetty keskiarvora-keisuudet kuorman vaihtoissa sekä kuorman keskellä. Violetti viiva kuvaa kuorman keskeltä otettuja näytteitä, vaalean sininen puolestaan kuorman vaihtoja. Kuvassa on myös esitetty mustalla Asfalttinormeissa sallitut raja-arvot rakeisuudelle.



Kuva 37. VT1: Keskimääräinen rakeisuus kuormanvaihtoissa ja kuormien keskellä (Nevalainen 2014).

Poranäytteistä määritelty sideainepitoisuus poikkesi Asfalttinormeissa määritellyistä raja-arvoista kuuden näytteen osalta. Näistä näytteistä viidellä mitattiin selvästi liian alhaisia sideainepitoisuuksia. Näissä kohdissa myös 2 mm seulan läpäisy- % oli selvästi alhaisempi. Neljä edellä mainittua näytettä oli porattu kuormanvaihtojen kohdalta, yksi näyte keskeltä kuormaa. Tulos tukee hyvin havaintoa, että kuormanvaihdossa esiintyy massalajittumaa. Tyhjätilat eivät kuitenkaan olleet merkittävästi muuta päällystettä korkeammat lajittuneissa kohdissa, vaikka näissä kohdissa mitattiinkin suurimmat tyhjätilan arvot. Koska tyhjätila oli varsin alhainen koko päällystyskohteella, voidaan todeta tiivistystyön onnistuneen.

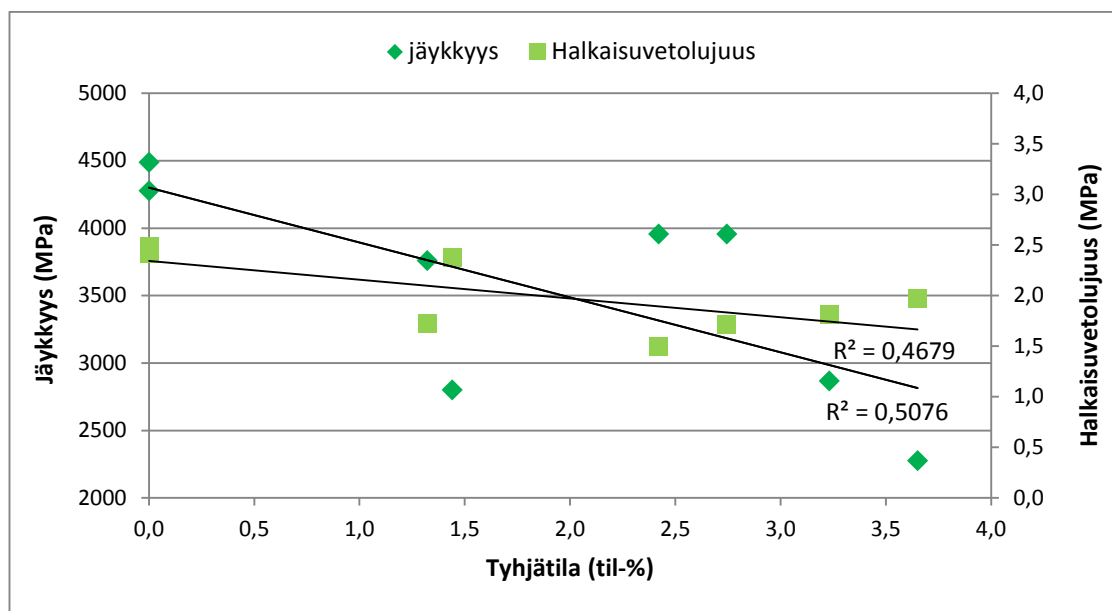
Tarkasteltaessa mittaustuloksia koko kohteen osalta havaitaan selvästi eroja kuormanvaihtojen ja kuorman keskiosien välillä. Alla (kuva 38) on kuvattu lämpötilan, sideainepitoisuuden, rakeisuuden sekä tyhjätilan vaihtelu kaistan poikittais- ja sivuttaissuunnassa. Havaitaan, että kuorman keskeltä mitatut arvot ovat säännöllisesti korkeammat kuin kuormanvaihdossa. Poikittaissuunnassa erot ovat pieniä, mutta tyhjätila on kuitenkin korkeampi kaistan reunoilla kuin kaistan keskellä. Korkeimmat tyhjätilat mitattiin keskisauman puoleisesta laidasta. Keskisauman vierellä myös sideainepitoisuus sekä rakeisuus olivat muuta päällystettä alhaisemmat. Erot sideainepitoisuudessa ja rakeisuudessa viittaavat levittimen toimintaan, sillä levittimen kierukat voivat lajittaa massaa, jos massa ei sekoitu levittimessä kunnolla. Korkeammat tyhjätilat voivat johtuvat alhaisemmasta sideainepitoisuudesta ja karkeammasta kiviaineksestä sekä tiivistyksen epäsäännöllisyydestä.

	1	2	3	4	maks-min				
					33,60	0,72	1,78	2,27	
Keski1					160,7	5,80	18,6	2,00	
Vaihto1					151,1	5,55	18,0	2,72	
Keski2					158,9	5,99	19,1	1,85	
Vaihto2					140,0	5,84	18,0	1,94	
Vaihto3					148,6	6,00	19,8	1,92	
Keski3					170,1	6,05	19,0	1,50	
Vaihto4					163,2	6,16	19,0	0,86	
Keski4					173,6	6,27	19,4	0,46	

	maks-min				
Lämpötila (°C)	6,20	155,2	161,4	159,1	157,5
Sideainepit.(%)	0,29	6,00	6,04	6,04	5,75
2 mm (läp.- %)	1,13	18,6	18,9	19,5	18,4
Tyhjätila (%)	1,63	1,79	0,94	1,32	2,57

Kuva 38. VT1: Tunnuslukuja laboratoriomittauksista. Oikean puoleisessa taulukossa esitetyt arvot ovat kaistan poikittaissuuntaisia keskiarvoja ja kuvan alla esitetyssä taulukossa kaistan pituussuuntaisia keskiarvoja.

Halkaisuvetolujuutta tarkasteltaessa havaittiin lämpötilan ja lujuuden välillä heikko korrelaatio. Tyhjätilan ja lujuuden välillä oli havaittavissa selvempi yhteys. Tyhjätilan pienentyessä ja sideainepitoisuuden kasvaessa lujuus parani. Samanlaiset havainnot tehtiin myös jäykkyysmittausten osalta. Havainnot on esitetty kuvassa 39.



Kuva 39. VT1: Halkaisuvetolujuuden ja tyhjätilan sekä jäykkyyden ja tyhjätilan välinen korrelaatio.

Urakoista oli mahdollista saada bonusta, jos pysähdysten määrä, kylmien alueiden sekä riskialueiden osuus olivat vähäisiä. Taulukossa 12 on esitetty bonuslaskelman kaistakohtaiset tulokset.

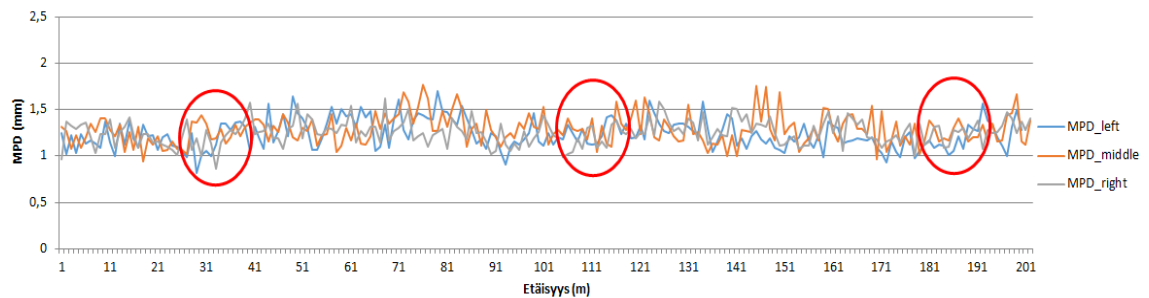
Taulukko 12. VT1: Bonuslaskelman tunnusluvut kaistoittain.

Kohde	Lämpötilan keskiarvo (°C)	Pysähdykset > 2 min (kpl)	Kylmät alueet (%)	Riskialueet (%)
1 111 26/2469 – 27/4010m	158,5	1	0,52	8,30
1 112 26/2468 – 27/4010m	157,2	4	0,43	7,24
1 221 26/2530 – 27/4000m	157,0	2	0,56	7,86
1 222 26/2530 – 27/4000m	158,4	5	0,44	7,35

Valtatie 1:n urakassa oli keskimäärin 0,4 pysähdystä kilometrillä, mikä oli tarkasteltavista urakoista vähäisin määrä. Yhteensä yli 2 min pysähdyksiä oli vain 12 koko päällystettävällä osuudella eli noin 32 km matkalla. Kylmien alueiden osuus vaihteli vain vähän tarkasteltaessa kaistojen välisiä eroja, mutta kun tarkastellaan mittausjaksojen eli 1 km pituisten jaksojen välisiä eroja, oli vaihtelu selvästi suurempaa. Mittausjaksoilla kylmien alueiden osuus vaihteli 0,14–1,98 % välillä. Vastaavasti riskialueiden osuus vaihteli mittausjaksojen välillä 5,2 %:sta aina 11,2 %:iin asti. Kaistakohtainen vaihtelu oli vain 1 % suuruinen. Huomion arvoista on havaita, että kaistoilla, joilla pysähdysten määrä oli suurin, kylmien alueiden ja riskialueiden osuus oli hieman alhaisempi kuin kaistoilla, joilla pysähdyksiä oli vähän (kts. taulukko 12). Kylmiä alueita sekä riskialueita oli hieman vähemmän ohituskaistoilla molempiin suuntiin päällystettäessä.

Urakassa maksettiin bonusta pysähdysten osalta jokaiselta jaksolta, jolla mittausdataa saatiin kerättyä riittävästi. Sen sijaan kylmien alueiden sekä riskialueiden osalta bonusta ei maksettu, sillä arvot ylittivät raja-arvot jokaisella mittausjaksolla. Pois luettuna kaksi noin 100 m jaksoa, joilla raja-arvot alittuivat. Kohteen pitkä kuljetusmatka, noin 50 km, näkyi muita kohteita suurempana riskialueiden osuutena, sillä massa ehti jäähtyä kuljetuksen aikana laajemmalla alueella, jolloin kuormanvaihdot näkyivät lämpötilamatossa laajempina alueina.

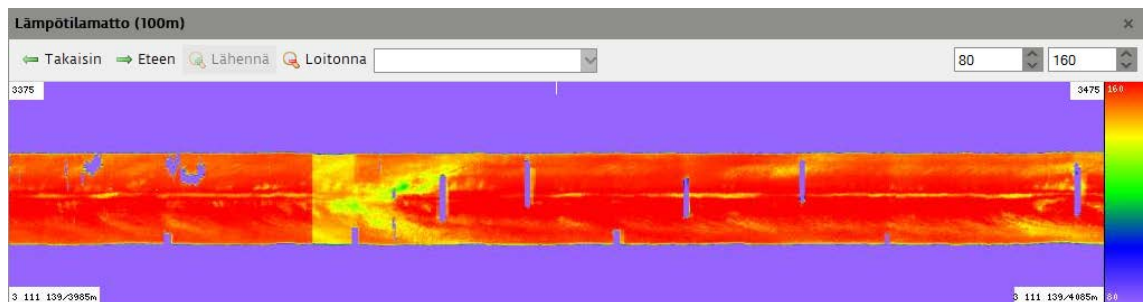
PTM -mittausten avulla oli tarkoitus tutkia, havaitaanko kylmemmät alueet eli kuormanvaihdot jälkikäteen tehdyistä mittauksista. MPD -mittausten avulla ei havaittu kuormanvaihtojen poikkeavan muusta mittausdatasta, kuten kuvasta 40 on nähtävissä. Kuormanvaihdot on ympyröity punaisella. Samanlaisen tuloksen antoivat myös IRI4 -mittaukset. Koska kyseessä oli SMA 16 -massa, eivät erot pinnan karkeudessa todennäköisesti ole tarpeeksi suuria, jotta ne havaittaisiin MPD -mittauksin. Myöskään merkittävää massalajittumaa tai suuri eroja rakeisuudessa ei havaittu tällä kohteella. Lisäksi kohteella ei havaittu kuormanvaihtoja, joissa lämpötila olisi ollut erittäin alhainen.



Kuva 40. VT1: Esimerkki MPD -mittaustuloksista. Kuormanvaihdot on ympyröity punaisella.

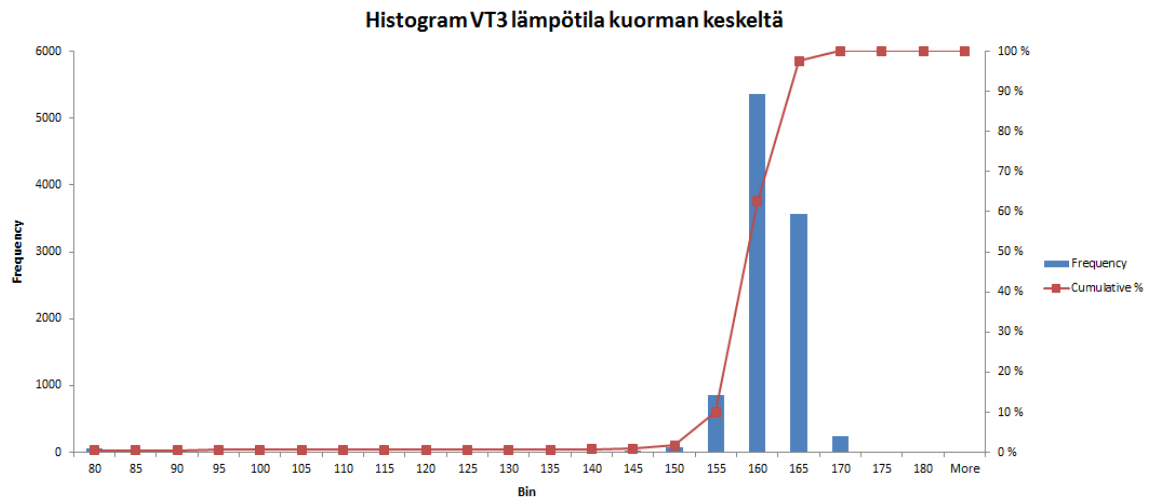
6.2 VT3 - Tampereen läntinen kehätie

Valtatie 3:n tutkimuskohteella koko kohteen lämpötilan keskiarvo oli selvästi alhaisempi kuin muilla kohteilla, 152,7 °C. Toisaalta tällä kohteella lämpötilaerot kuormanvaihtojen sekä kuorman keskiosien välillä olivat pienimmät eli lämpötila oli tasaisin. Tasaisimpaan lämpötilaan vaikutti tarkasteltavista kohteista lyhyin kuljetusmatka, keskimäärin 22 km. Kuljetuksen aikana massa ei ehtinyt jäähtyä yhtä paljon kuin esimerkiksi valtatie 1:n kohteella, jossa kuljetusmatka oli yli 2-kertainen. Keskimäärin lämpötilaero kuormanvaihtojen ja kuorman keskiosien välillä oli 9 °C. Kuvassa 41 alla on esitetty havainnekuva lämpötilamatosta. Vaikka lämpötilaero kuormanvaihtojen ja kuorman keskiosien välillä olikin pienempi kuin muilla kohteilla, kuormanvaihdot ovat silti selvästi havaittavissa.

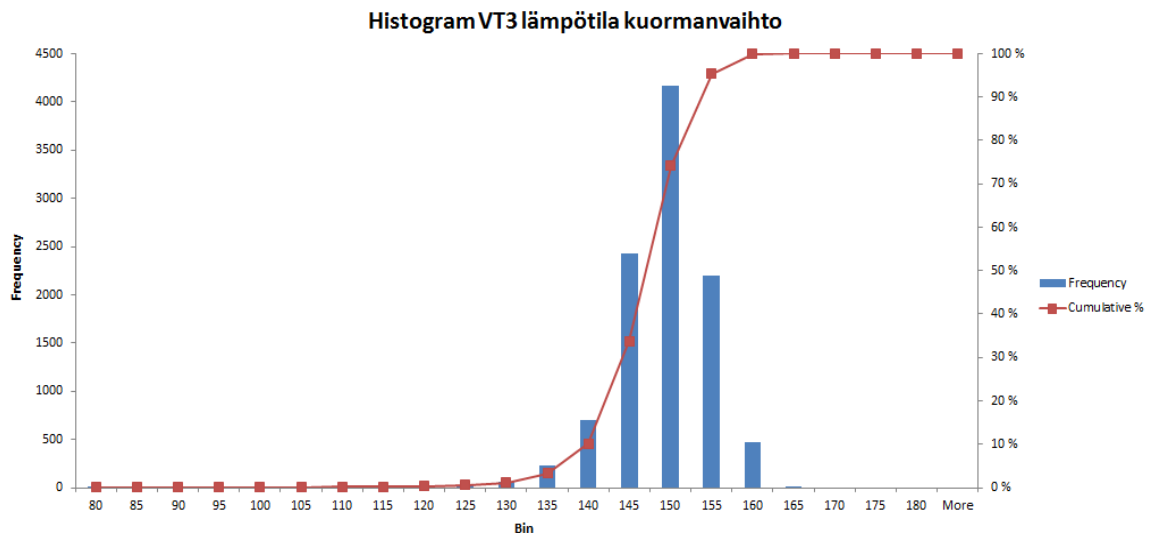


Kuva 41. VT3: Esimerkkikuva lämpötilamatosta (Roadscanners Oy 2014).

Tarkasteltaessa lämpötilajakaumia havaitaan kuorman keskiosissa lämpötilan olevan hyvin tasainen. Kuvassa 42 on esitetty esimerkkikuva histogrammista kuorman keskeltä mitatuista lämpötila-arvoista. Kyseisellä kohdalla lämpötilan keskiarvo oli noin 159 °C. Kun vastaavasti tarkastellaan lämpötilajakaumaa kuormanvaihdon kohdalla, havaitaan lämpötilan jakautuvan laajemmalle alueelle. Kuvassa 43 on esimerkki kuormanvaihtokohdasta. Tässä kohdassa lämpötilan keskiarvo oli noin 147 °C ja lämpötila vaihteli keskimäärin 135–160 °C välillä.

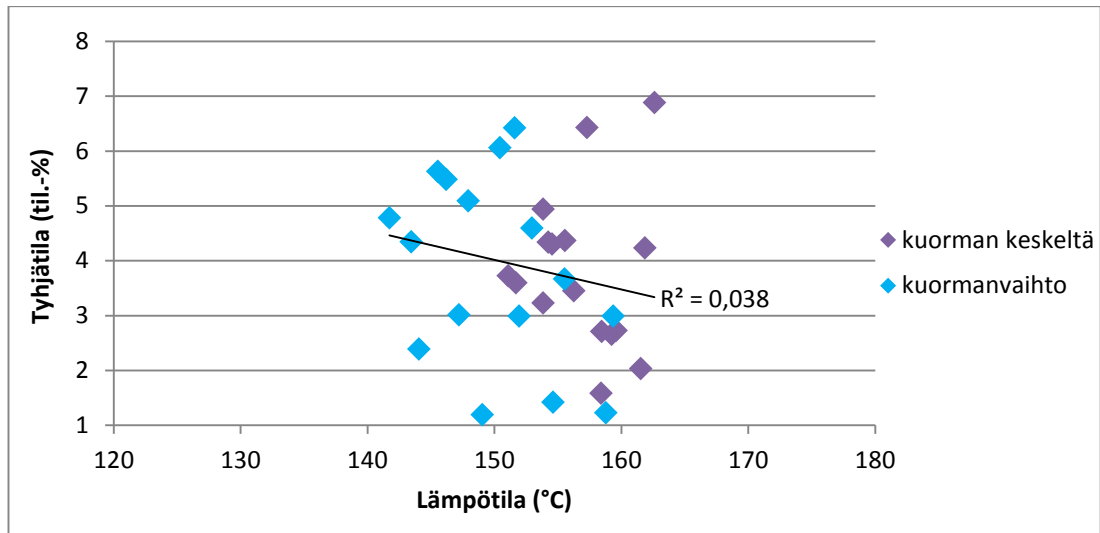


Kuva 42. VT3: Lämpötilan jakautuminen mitattuna kuorman keskeltä.



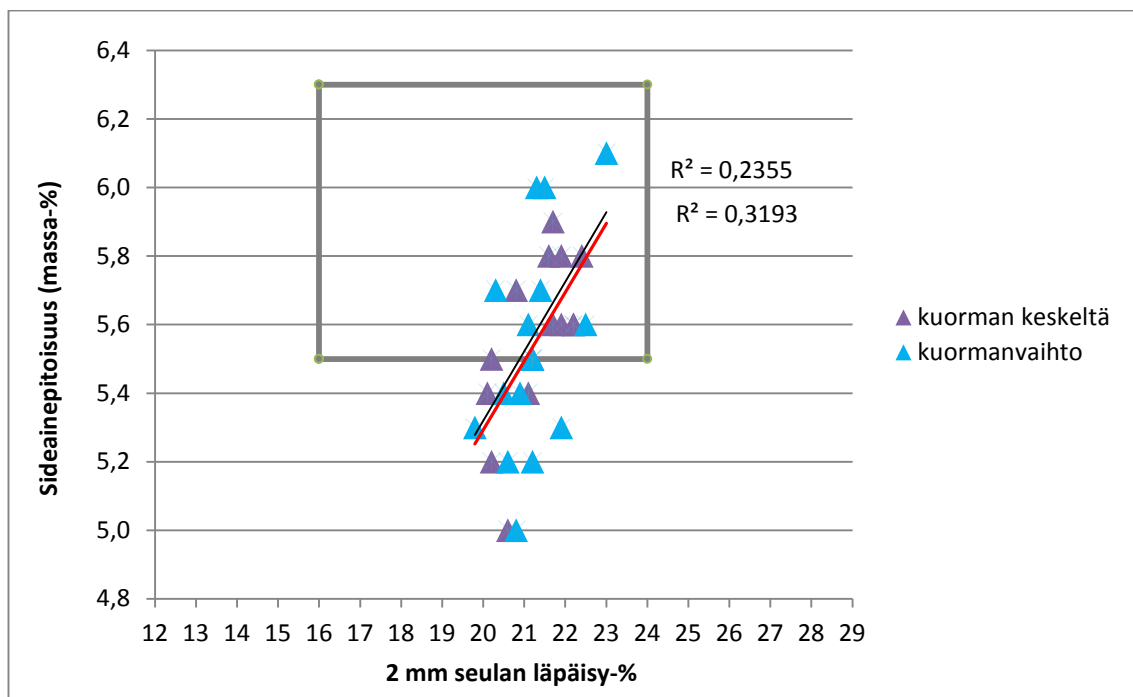
Kuva 43. VT3: Lämpötilan jakautuminen kuormanvaihdossa.

Kun tarkastellaan lämpötilan ja tyhjätilan välistä yhteyttä, havaitaan pienen lämpötilaeron kuormanvaihtojen sekä kuorman keskiosan välillä vaikuttavan tuloksiin selvästi. Päälysteen lämpötilan ja tyhjätilan välillä ei ole havaittavissa korrelaatiota vähäisten lämpötilaerojen vuoksi (kuva 44). Suurimmat tyhjätilat mitattiin kaistan oikeassa reunassa, mikä viittaa epätasaiseen tiivistykseen.



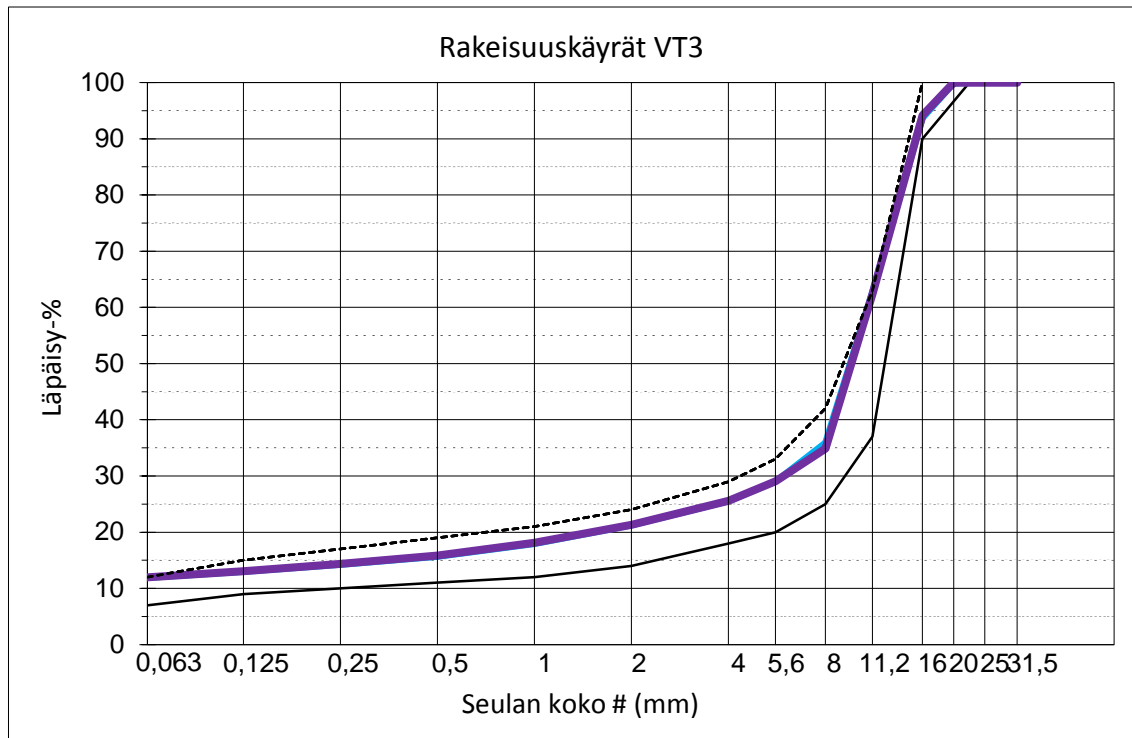
Kuva 44. VT3: Lämpötilan ja tyhjättilan välinen yhteys.

Kuvasta 45 havaitaan, että sideainepitoisuus vaihtelee selvästi, vaikka vaihtelut rakeisuuden arvoissa ovat pieniä. Tämä johtuu todennäköisesti asfalttiaseman toiminnasta, sideainepitoisuuden vaihtelu nimittäin viittaa häiriöihin massan valmistuksessa. Suhteustietojen mukaan massan sideainepitoisuuden ohjearvo oli 5,9 % ja 2 mm rakeisuuden ohjearvo 20 %. Asfalttinormien mukaan sideainepitoisuuden sallittu hajonta on $\pm 0,4$ % ja 2 mm rakeisuudelle sallitaan ± 4 mm hajonta. Sallitut hajonnat on esitetty harmaalla viivalla.



Kuva 45. VT3: Rakeisuuden ja sideainepitoisuuden välinen korrelaatio. Kuvassa on esitetty kaksi korrelaatiota. Punaisella esitetyistä korrelaatiosta on poistettu poikkeava havainto (näyte 3).

Rakeisuuskäyrät olivat hyvin samanlaiset sekä kuormanvaihdosta otetuilla näytteillä kuin kuorman keskeltä otetuilla näytteillä. Rakeisuuksissa ei ollut merkittäviä eroja, kuten myös kuvasta 46 nähdään. Kuvassa on esitetty keskimääräinen rakeisuus kuormanvaihdossa sekä kuormien keskellä. Kuvaan on merkitty myös Asfalttinormeissa määritetyt rakeisuuden ylä- ja alarajat SMA 16 -massalle.



Kuva 46. VT3: Keskimääräinen rakeisuus kuormanvaihtoissa ja kuormien keskellä.

Sideainepitoisuus poikkesi Asfalttinormeissa määritetyistä raja-arvoista yhdeksän näytteen osalta. Näistä näytteistä kahdeksalla oli sideainepitoisuus selvästi sallittua alhaisempi. Kuormanvaihtojen kohdalla alhainen sideainepitoisuus mitattiin kuudesta näytteestä ja kuorman keskellä kahdesta näytteestä. Alhaisen sideainepitoisuuden lisäksi rakeisuus oli muuta päällystettä hieman karkeampi kyseisissä kohdissa. Myös tyhjätilat olivat korkeita. Tosin suurimmat tyhjätilat mitattiin kohdista, joissa sideainepitoisuus tai rakeisuus ei poikennut keskiarvosta. Tämä viittaa epätasaiseen tiivistystyöhön.

Kun tarkastellaan lämpötilan, sideainepitoisuuden, rakeisuuden ja tyhjätilan kaistan pituus- sekä poikittaissuunnassa (kuva 47), havaitaan kuormanvaihtojen sekä kuorman keskiosien välillä säännöllinen ero arvoissa, vaikka erot ovatkin pieniä. Poikittaissuunnassa eroja esiintyy huomattavasti enemmän. Kaistan oikeassa reunassa tyhjätilat ovat korkeat, vaikka lämpötilat ovat lähellä keskiarvoa. Kaistan oikealla reunalla mitattiin korkeimmat tyhjätilat, jopa yli 6 %. Vaikka tyhjätilat olivat kaistan oikealla reunalla korkeat, sideainepitoisuus tai rakeisuus ei ollut muuta päällystettä alhaisempi. Syy korkeisiin tyhjätiloihin kaistan oikealla reunalla on todennäköisesti puutteellisessa jyräyksessä, jolloin päällyste ei ole tiivistynyt kunnolla.

	1	2	3	4	maks-min			
Vaihto1					12,10	0,57	1,33	1,23
Keski1					153,1	5,40	21,3	3,8
Keski2					157,1	5,58	21,5	4,4
Vaihto2					157,0	5,47	21,5	3,5
Keski3					146,6	5,61	20,5	4,0
Vaihto3					158,7	5,46	20,7	4,2
Keski4					149,1	5,54	21,2	3,2
Vaihto4					154,6	5,97	21,7	3,2
					151,3	5,58	21,8	4,3

	maks-min				
Lämpötila (°C)	9,48	148,8	153,8	158,3	152,9
Sideainepit.(%)	0,45	5,37	5,52	5,83	5,59
2 mm (läp.- %)	0,78	20,8	21,3	21,6	21,3
Tyhjätila (%)	2,31	4,3	3,4	2,7	5,0

Kuva 47. VT3: Tunnuslukuja laboratoriomittauksista.

Halkaisuvetolujuuden ja jäykkyyden tulokset olivat suuruusluokaltaan valtatie 1:n tuloksia vastaavat, sillä molemmilla kohteilla käytettiin SMA 16 -massaa. Valtatiellä 3 mitattiin suurimmat arvot jäykkyydelle. Verrattaessa tuloksia tutkimukseen, jossa tarkasteltiin viisi vuotta vanhan päällysteen kestävyyttä Kehä II:lla, halkaisuvetolujuuden arvot olivat Kehä II:lta mitattujen arvojen kanssa samaa suuruusluokkaa. Jäykkyys sen sijaan oli selvästi alhaisempi kuin Kehä II:n mittauksissa. (Pellinen ym. 2013.) Vastavat havainnot pätevät myös muille tämän tutkimuksen koekohteille.

Halkaisuvetolujuuden mittauksissa ei ole selvästi havaittavissa lämpötilan vaikutusta tuloksiin, mikä selittyy vähäisillä lämpötilaeroilla näytteiden välillä. Kuitenkin lämpötilan kasvaessa lujuuden arvot kasvoivat hieman ja trendi oli nouseva. Sideainepitoisuudella tai rakeisuudella ei havaittu olevan vaikutusta halkaisuvetolujuuteen. Tyhjätilan kasvu alensi hieman lujuutta. Jäykkyysmittauksissa puolestaan havaittiin sideainepitoisuuden kasvun parantavan jäykkyyttä, myös 2 mm seulan läpäisy - %:n kasvu paransi jäykkyyttä.

Taulukossa 13 on esitetty pysähdysten määrä, kylmien alueiden osuus sekä riskialueiden osuus kaistakohtaisesti valtatie 3:n osalta.

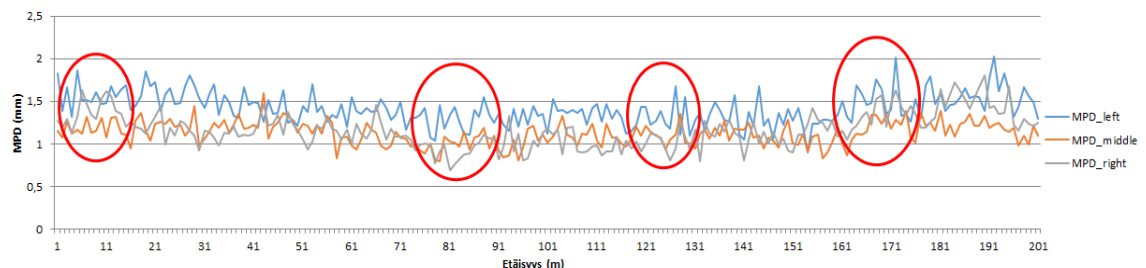
Taulukko 13. VT3: Bonuslaskelman tunnusluvut kaistoittain.

Kohde	Lämpötilan keskiarvo (°C)	Pysähdykset > 2 min (kpl)	Kylmät alueet (%)	Riskialueet (%)
3 111 136/0 – 137/1100m	154,3	7	0,56	5,08
3 112 136/0 – 137/1050m	153,7	8	1,08	5,36
3 221 136/0 – 137/1050m	150,8	4	1,10	5,28
3 222 136/0 – 137/1050m	153,6	14	0,40	4,33
3 111 139/610 – 139/5850m	153,0	2	0,25	3,44
3 112 139/610 – 139/5850m	150,0	0	4,57	7,06
3 221 139/610 – 139/5850m	153,3	13	0,86	4,40
3 222 139/610 – 139/5850m	151,5	10	1,90	4,35

Kohteella rekisteröitiin eniten pysähdyksiä, yhteensä 58 yli 2 min pysähdystä. Pysähdysten määrä vaihteli kaistakohtaisesti suuresti. Myös kylmien alueiden osuudessa oli erittäin suurta vaihtelua kaistojen välillä. Yhdellä kaistalla kylmien alueiden sekä riskialueiden osuus oli selvästi suurempi kuin kohteella muuten. Tällä kaistalla ei kuitenkaan ollut yhtään yli 2 minuutin pysähdystä. Suuret kylmien ja riskialueiden osuudet saattavat johtua normaalia alhaisemmasta massan lämpötilasta (150 °C), sillä tällä kaistalla keskilämpötila oli kohteen alhaisin.

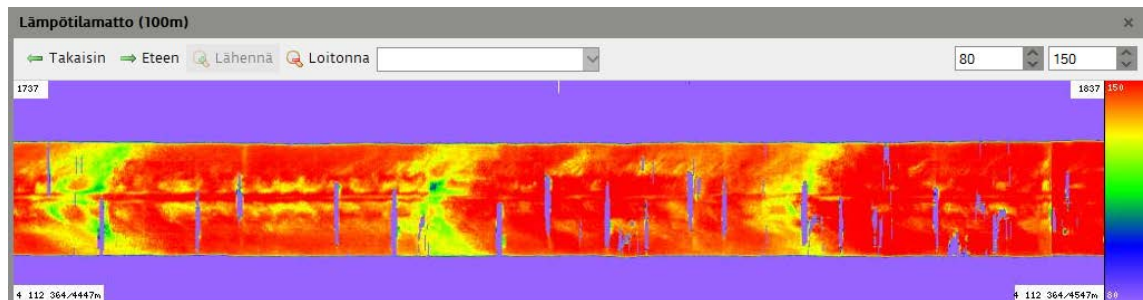
Kaiken kaikkiaan riskialueiden osuus oli tarkasteltavista kohteista alhaisin, keskimäärin 4,94 % päällysteen pinta-alasta kilometrillä. Tämä selittyy muita kohteita lyhyemmällä kuljetusmatkalla, jolloin massa ei ehdi jäähtyä yhtä suurelta alalta, eikä täten kuormanvaihtojen ja kuorman keskiosan välille pääse syntymään suurta lämpötilaeroa. Toisaalta kohteella havaittiin suurimmat kylmien alueiden osuudet, mikä puolestaan selittyy pysähdysten suurella määrällä. Yli 2 minuutin pituisten pysähdysten aikana päällysteen lämpötila laski selvästi alle 100 °C:een.

PTM -mittauksia tarkasteltaessa MPD -mittaustuloksista eivät kuormanvaihtojen kohdat erottuneet muusta datasta, kuten eivät valtatie 1:n mittauksissakaan. Massatyypin lisäksi tuloksiin vaikuttavat myös kohteella havaitut alhaiset lämpötilaerot kuormanvaihtojen ja kuorman keskiosien välillä. Kuvassa 48 on esitetty MPD -tulokset oikean ajouran, vasemman ajouran sekä kaistan keskiosan osalta. Kuormanvaihdot on ympyröity punaisella.

**Kuva 48. VT3: Esimerkkikuva MPD -mittaustuloksista.**

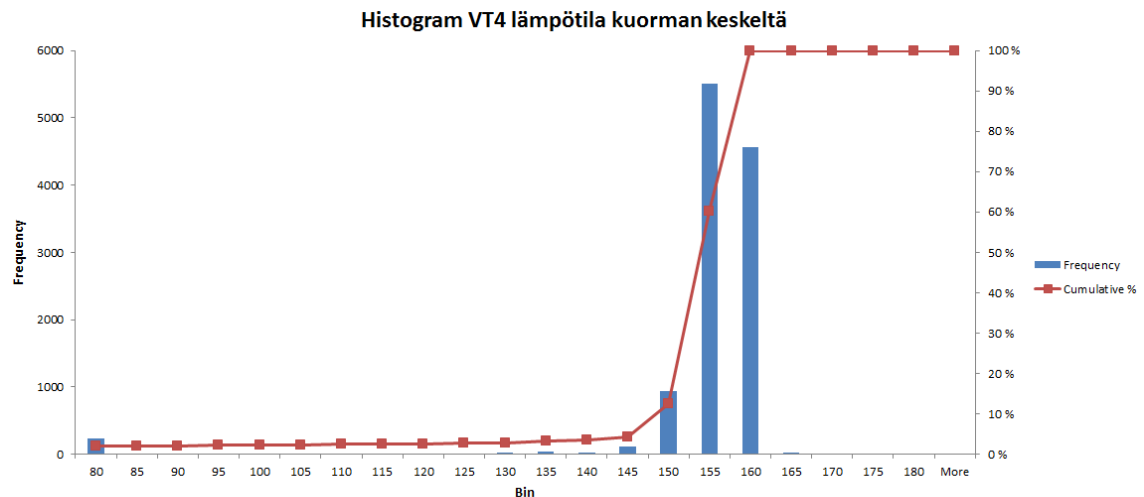
6.3 VT4 - Kempele

Kohteella mitattu päällysteen pinnan lämpötila oli keskimäärin 156,0 °C. Lämpötilaero kuormanvaihtojen ja kuorman keskiosien välillä oli keskimäärin 13 °C, mikä oli jonkin verran korkeampi kuin valtatie 3:n kohteella, vaikka kuljetusmatka oli lähes yhtä pitkä. Tällä kohteella kuljetusmatka oli noin 25 km, kun taas valtatiellä 3 kuljetusmatka oli keskimäärin 22 km. Massan jäähtymiseen vaikuttavat kuljetusmatkan pituuden lisäksi myös käytettävä kalusto sekä sääolosuhteet. Ainakin työmaavierailun aikana sää oli sateinen ja kolea, mikä osaltaan saattaa selittää lämpötilaeroa. Alla on esimerkkikuva lämpötilamatosta, josta ovat selvästi nähtävissä kuormanvaihdot muuta päällystettä kylmempinä kohtina (kuva 49).

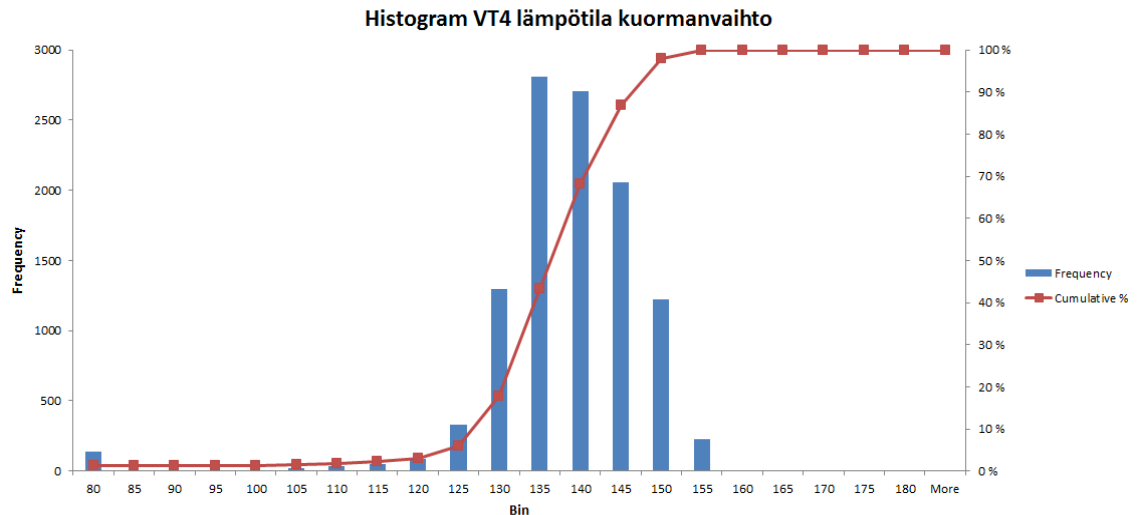


Kuva 49. VT4: Esimerkki lämpötilamatosta (Roadscanners Oy 2014).

Histogrammeista (kuvat 50 ja 51) nähdään lämpötilan jakautuminen kuorman keski-osassa sekä kuormanvaihdossa. Kuorman keskiosassa lämpötila oli keskimäärin 154 °C ja lämpötila oli tasainen. Kuormanvaihdossa puolestaan lämpötila vaihteli laajemmin, tyypillisesti 125–155 °C välillä, keskiarvo oli noin 136 °C.

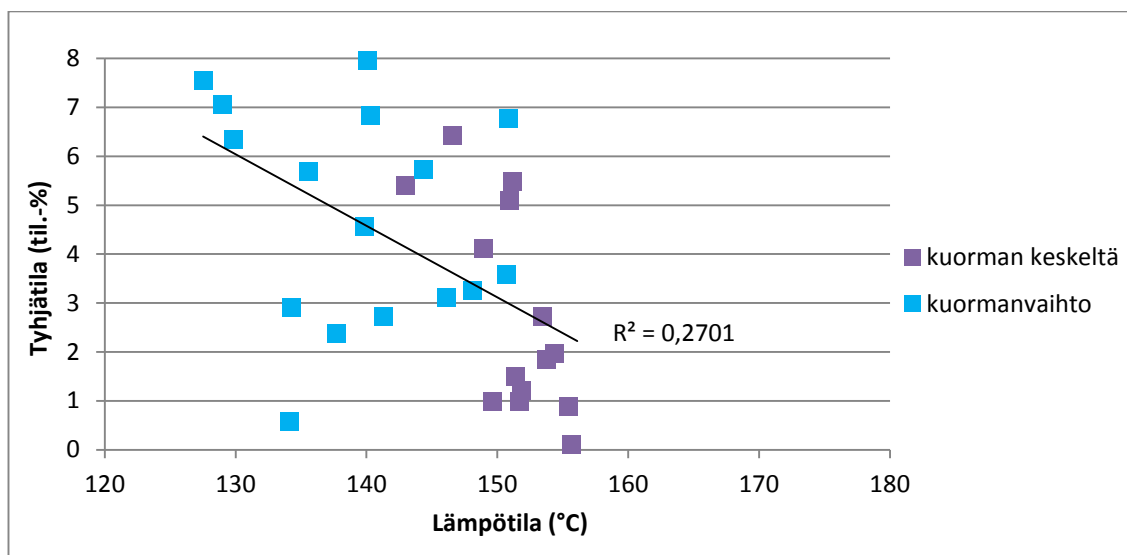


Kuva 50. VT4: Lämpötilan jakautuminen kuorman keskeltä mitattuna.

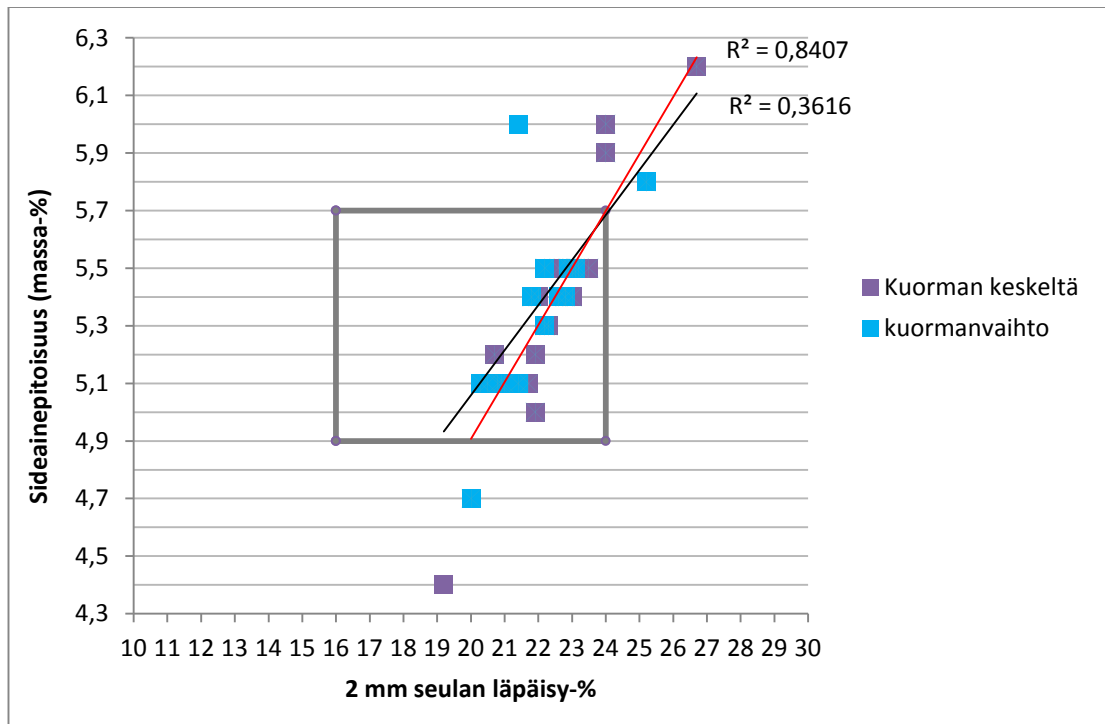


Kuva 51. VT4: Lämpötilan jakautuminen kuormanvaihdossa.

Tyhjätilan ja lämpötilan välillä on havaittavissa korrelaatio (kuva 52). Etenkin kuorman keskiosista otettujen näytteiden tyhjätilan havaitaan laskevan lämpötilan kasvaessa. Kuormanvaihtokohdista määritetyillä näytteillä hajonta oli selvästi suurempaa ja tyhjätilan arvot vaihtelivat suuresti. Tämä johtuu massan mahdollisesta lajittumisesta kuormanvaihdossa, sillä sideainepitoisuudessa ja rakeisuudessa havaittiin suurta vaihtelua. Tyhjätila kasvoi erittäin suureksi alle 135 °C asteen lämpötiloissa muutamaa näytettä lukuun ottamatta. Näytteillä, joilla mitattiin korkeimmat tyhjätilat, ei havaittu suuria poikkeamia sideainepitoisuudessa tai rakeisuudessa, mikä viittaa siihen, että päällyste oli liian viileää riittävän tiiveysasteen saavuttamiseksi. Kahdella näytettä tyhjätila oli kuitenkin alhainen, vaikka päällysteen lämpötila oli matala, alle 135 °C. Tämä johtuu siitä, että kyseisillä näytteillä sideainepitoisuus sekä 2 mm seulan läpäisy - % oli normaalia korkeampi, jolloin massa tiivistyi helpommin alhaisesta lämpötilasta riippumatta. Kun tarkastellaan rakeisuuden ja sideainepitoisuuden välistä yhteyttä (kuva 53), havaitaan lineaarinen korrelaatio parametrien välillä, mikä viittaa massalajittumaan. Suhteutustietojen mukaan massan sideainepitoisuuden ohjearvo oli 5,9 % ja 2 mm rakeisuuden ohjearvo 20 %. Asfalttinormien mukaan sideainepitoisuuden sallittu hajonta on $\pm 0,4$ % ja 2 mm rakeisuudelle sallitaan ± 4 mm hajonta. Sallitut hajonnat on esitetty harmaalla viivalla.

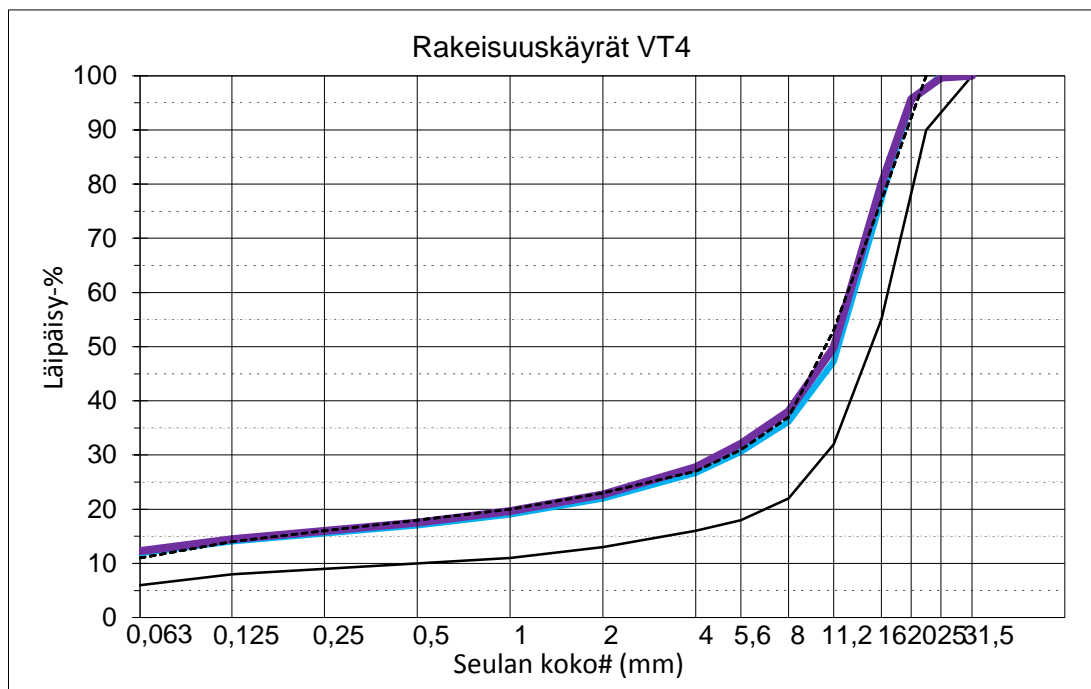


Kuva 52. VT4: Lämpötilan ja tyhjätilan välinen korrelaatio.



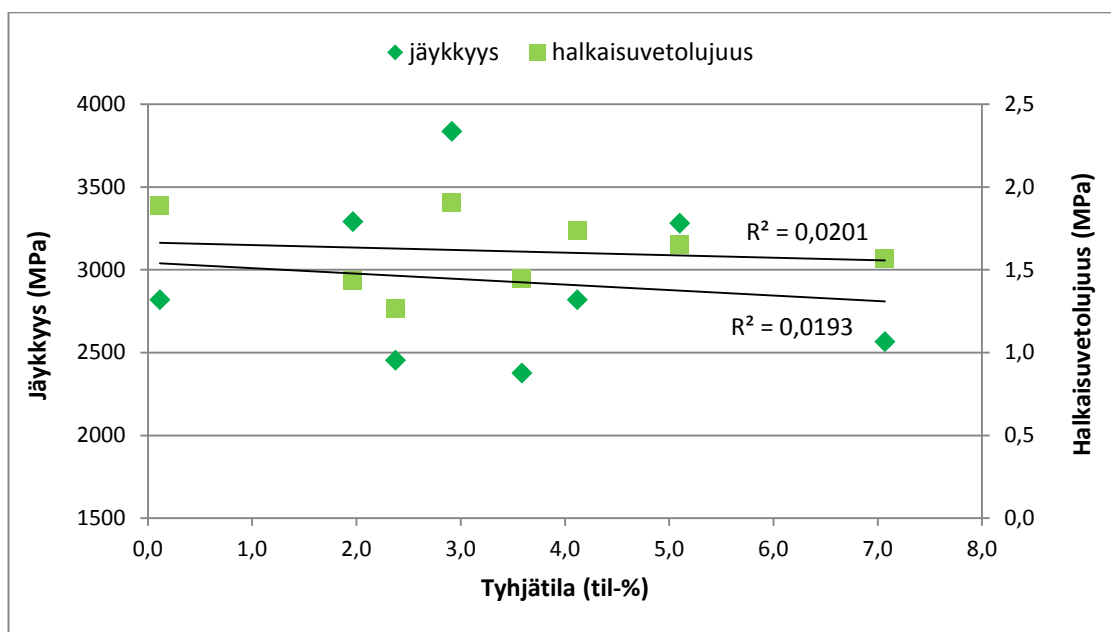
Kuva 53. VT4: Rakeisuuden ja sideainepitoisuuden välinen korrelaatio. Kuvassa on esitetty kaksi korrelaatiota. Punaisella esitetystä korrelaatiosta on poistettu poikkeavat arvot (näytteet 27 ja 29).

Rakeisuuskäyriä tarkasteltaessa havaittiin selvästi suurempia eroja rakeisuuskäyrän muodossa kuin muilla tutkimuskohteilla. Tämä selittyy muita kohteita karkeammalla massalla, joka lajittuu hienompirakeisia massoja helpommin. Kuvassa 54 on esitetty keskimääräiset rakeisuuskäyrät kuormanvaihtoista otetuille näytteille sekä kuorman keskeltä otetuille näytteille. Rakeisuuskäyrien muodossa on nähtävissä eroja, kuormanvaihtoissa massa oli hieman karkeampaa. Kuvaan on myös merkitty Asfalttinormeissa esitetyt rakeisuuden sallitut ylä- ja alarajat.



Kuva 54. VT4: Keskimääräinen rakeisuus kuormanvaihtoissa ja kuorman keskellä.

Lämpötilan havaittiin välillisesti vaikuttavan jonkin verran myös halkaisuvetolujuuden tuloksiin. Lämpötilan kasvaessa lujuus kasvoi. Sideainepitoisuudella oli lämpötilaa merkittävämpi vaikutus lujuuden arvoihin. Kuvassa 56 on esitetty halkaisuvetolujuuden ja tyhjätilan välinen yhteys. Kuvaan on merkitty myös jäykkyyden ja tyhjätilan välinen korrelaatio. Tyhjätilan kasvu heikensi halkaisuvetolujuutta hieman, muttei merkittävästi. Kohteella mitattiin alhaisimmat arvot sekä halkaisuvetolujuuden että jäykkyyden osalta. Tulokseen vaikuttaa näytteiden poraaminen lähes välittömästi päällystämisen jälkeen, jolloin päällyste ei ollut vielä jäähtynyt kunnolla. Myös muista kohteista poikkeava massatyyppe saattaa vaikuttaa tuloksiin.



Kuva 56. VT4: Halkaisuvetolujuuden ja tyhjätilan sekä jäykkyyden ja tyhjätilan välinen korrelaatio.

Bonusmenettelyä varten kohteilta laskettiin pysähdysten määrä, kylmien alueiden osuus sekä riskialueiden osuus. Taulukossa 14 on esitetty tulokset kaistakohtaisina keskiarvoina valtatie 4:n osalta.

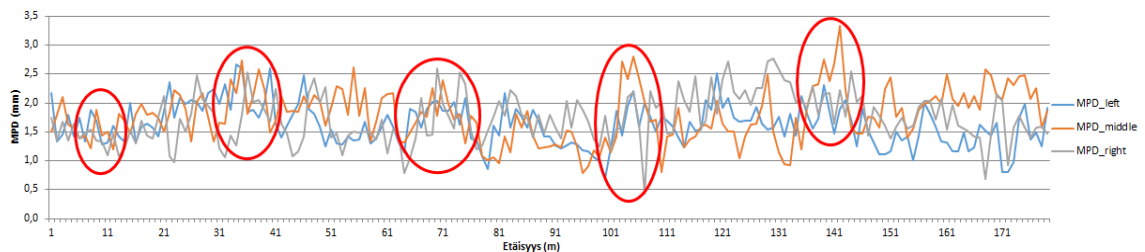
Taulukko 14. VT4: Bonuslaskelman tunnusluvut kaistoittain.

Kohde	Lämpötilan keskiarvo (°C)	Pysähdykset > 2 min (kpl)	Kylmät alueet (%)	Riskialueet (%)
4 111 364/2710 – 364/8850m	157,4	1	0,39	5,65
4 112 364/2710 – 364/8850m	154,3	4	0,39	5,19
4 221 364/2715 – 364/4300m	156,5	1	0,40	6,17
4 222 364/2715 – 364/4300m	156,9	5	0,56	5,82

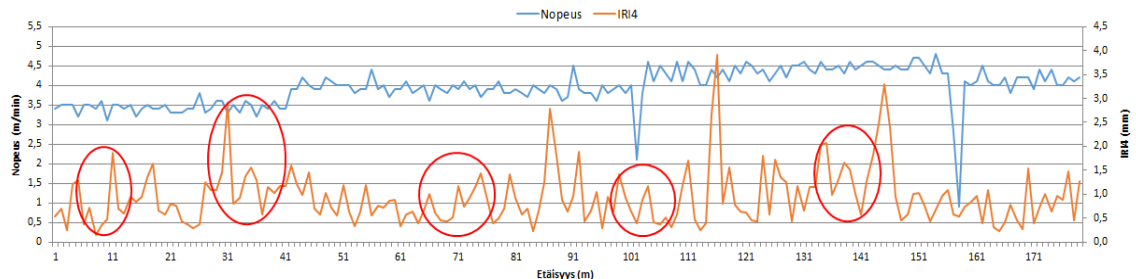
Pysähdyksiä oli keskimäärin 0,7 kilometrillä, mikä oli vähemmän kuin valtatie 3:n kohdeella, mutta enemmän kuin valtatiellä 1. Yhteensä yli 2 min pysähdyksiä oli 11 koko kohteella. Kylmien alueiden osuus oli keskimäärin 0,41 % päällysteen pinta-alasta kilometrillä ja tulos olikin tarkasteltavista kohteista alhaisin. Kylmien alueiden alhainen osuus selittyy pysähdysten vähäisellä määrällä sekä valtatie 1:n kohdetta puolet lyhyemmällä kuljetusmatkalla. Myös riskialueiden osuus oli valtatie 1:n kohdetta alhaisempi juuri kuljetusmatkan lyhyyden ansiosta. Riskialueiden osuus oli kuitenkin valtatie 3:n

urakkaa suurempi, mikä selittyy hieman pidemmällä kuljetusmatkalla ja korkeammalla massan lämpötilalla. Kun massa on kuumempaa, syntyy suurempi lämpötilaero jäähtyneen massan ja normaalin massan välille, mikä näkyy osittain riskialueiden osuudessa.

PTM -mittauksissa havaittiin MPD -tulosten korreloivan muita kohteita paremmin kuormanvaihtojen kanssa. Kuvassa 57 on esitetty MPD -mittaustuloksia kuvaajassa, johon on punaisella merkitty kuormanvaihdot. Todennäköisesti kuormanvaihdot erottuvat aineistosta muita kohteita paremmin karkeamman massan vuoksi. Lisäksi kuormanvaihdossa lämpötila oli muita kohteita alhaisempi. Kuormanvaihdot näkyvät korkeampina arvoina kuvaajassa, tosin poikkeuksiakin löytyy. MPD -arvojen havaittiin olevan korkeampia etenkin kohdissa, joissa levittimen nopeus oli alentunut merkittävästi tai levitin oli pysähtynyt. IRI4 -arvot eivät korreloineet yhtä selvästi kuormanvaihtojen tai levittimen nopeuden kanssa. IRI4 -arvoissa havaittiin vaihtelua myös kuorman keski-osissa, vaikka lämpötila oli korkea ja levittimen nopeus tasainen. IRI4 -arvo ja levittimen nopeus on esitetty kuvassa 58. Kuvaan on myös merkitty kuormanvaihdot. Kuvasta nähdään, ettei levittimen nopeuden ja IRI4 -arvojen välillä ole havaittavissa yhteyttä.



Kuva 57. VT4: Esimerkkikuva MPD -mittaustuloksista.



Kuva 58. VT4: Esimerkkikuva nopeuden ja IRI4 -arvojen vaihtelusta.

7 Yhteenvedo, päätelmät ja suositukset

Tutkimuksessa havaittiin päällysteen pintalämpötilalla olevan vaikutusta päällysteen ominaisuuksiin sekä päällystystyön onnistumiseen. Lämpötilan kasvaessa jyräykseen käytettävissä oleva aika pitenee ja päällysteen tyhjätilasta saadaan alhaisempi. Lämpötilan laskiessa puolestaan riittävän tiiveysasteen saavuttaminen vaikeutuu merkittävästi. Lisäksi kuormanvaihdossa havaitut alhaiset lämpötilat viittaavat usein massalajittumaan. Alla on esitetty yhteenvedotaulukko tutkimustuloksista (taulukko 15).

Taulukko 15. Yhteenvedotaulukko tutkimustuloksista.

	VT1 (SMA16)			VT3 (SMA16)			VT4 (SMA22)		
	KV ¹	KK ²	KOK ³	KV ¹	KK ²	KOK ³	KV ¹	KK ²	KOK ³
Lämpötila (°C)	148	166	158	148	157	153	140	152	156
Tyhjätila (til.-%)	1,86	1,45	1,66	3,83	3,83	3,83	4,82	2,30	3,56
2 mm seula (läp.-%)	18,67	19,00	18,83	21,20	21,32	21,26	21,98	22,31	22,14
Sideainepit. (massa-%)	5,89	6,03	5,96	5,53	5,62	5,58	5,34	5,46	5,40
Halk.vetolujuus (MPa)	1,995	2,003	1,999	2,006	1,898	1,952	1,547	1,677	1,612
Jäykkyys (MPa)	3396	3698	3547	4785	4515	4650	2808	3053	2930
Kuljetusmatka (km)	-	-	50	-	-	22	-	-	27
Kylmät alueet (% /km)	-	-	0,5	-	-	1,2	-	-	0,4
Riskialueet (% /km)	-	-	7,7	-	-	4,9	-	-	5,5
Pysähdykset (kpl/km)	-	-	0,4	-	-	1,0	-	-	0,7

¹ KV = keskiarvo kuormanvaihdosta mitattuna

² KK = keskiarvo kuormien keskeltä mitattuna

³ KOK = koko kohteen keskiarvo

Tyhjätilan arvoon vaikuttavat päällysteen lämpötilan ja massan homogeenisuuden lisäksi myös ulkoiset tekijät, kuten sää sekä työskentelytavat. Alhainen ulkoilman lämpötila ja sateinen sää nopeuttavat massan jäähtymistä ja vaikuttavat tiivistämisessä käytössä olevaan aikaan. Myös kuljetusmatkan pituudella havaittiin olevan selvä vaikutus päällysteen jäähtymiseen. Kuljetusmatkan kasvaessa kuormanvaihtokohtiin syntyi suurempi kylmäalue. Kuljetusmatkan lyhentämisellä ja kuljetusketjun huolellisella suunnittelulla voidaan vähentää massan jäähtymistä. Jyräyskalustolla ja väärillä työskentelytavoilla puolestaan voidaan saada aikaan epähomogeeninen päällyste. Yhdellä kohteella havaittiin suurimmat arvot tyhjätilassa kaistan reunalla, mikä viittaa epätasaiseen tiivistämiseen. Sillä vaikka kohteella havaitut tyhjätilat olivat kaistan reunalla muuta päällystettä suuremmat, sideainepitoisuus sekä rakeisuus eivät poikenneet merkittävästi muusta päällysteestä.

7.1 Lämpökamera

Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli tarkastella, miten vaatimus lämpökameran käytöstä päällystystöiden laadunvarmistuksen menetelmänä tulisi asettaa. Kesän 2013 lämpökameratutkimuksessa käytettiin Roadscanners Oy:n laatimaa bonuslaskentamenetelmää, joka ottaa huomioon pysähdysten määrän, kylmien alueiden osuuden sekä riskialueiden osuuden. Riskialueiden avulla pyrittiin kuvaamaan päällysteen homogeenisuutta. Roadscanners Oy:n laatimalla bonusjärjestelmällä kohteet saivat pääasiassa bonusta vain pysähdysten osalta, sillä muilla kriteereillä raja-arvot eivät yleensä täyttyneet.

Urakoitsijoilta saatujen kommenttien perusteella voidaan todeta lämpökameran olevan hyvä apuväline työskentelyn edistämiseen. Lämpökameralaitteistoon kuuluneen tietokoneen näytöltä oli helppo seurata lämpötilajakaumien muodostumista reaaliajassa. Lisäksi bonuslaskentajärjestelmä koettiin kannustavana menetelmänä. Tosin bonuskriteerit pidettiin liian tiukkoina. Myös laitteiston kokoon ja toimintaan ei oltu kaikilta osin tyytyväisiä. Laitteiston kokoa tulisi pienentää ja asentamista yksinkertaistaa.

Tutkimuksen aikana havaittiin lämpötilamaton olevan erittäin havainnollinen esitystapa ja Roadscanners Oy:n kehittämä web-palvelu toimi varsin hyvin. Web-palvelun käyttö oli yksinkertaista ja tietojen lataaminen onnistui kätevästi. Ainoastaan raakadatan lataamisessa web -palvelusta tietokoneelle oli ongelmia aineiston suuren tiedostokoon vuoksi.

Menetelmä soveltuu ennen kaikkea työnaikaiseen laadunohjaukseen, kuten urakoitsijoiden palautteestakin kävi ilmi. Lämpökameralaitteistoon kuuluvan näytön avulla on helppo seurata työn edistymistä ja ongelmakohdat havaitaan välittömästi. Myös työskentelytapojen muutokset voidaan nähdä välittömästi lämpötilamaton avulla.

Menetelmä soveltuu käytettäväksi myös tilaajan laadunvarmistuksessa, kuten esimerkiksi Yhdysvalloista ja Ruotsista osoittavat. Etenkin Ruotsissa päällysteen lämpötilaan perustuvaa laadunvarmistusta on käytetty jo pitkään hyvällä menestyksellä. Vaikka Yhdysvalloissa menetelmä ei olekaan vielä vakiintunut kaikkialle, muutamissa osavaltioissa menetelmä on jo käytössä ja useat osavaltiot ovat testaamassa menetelmän soveltuvuutta laadunvarmistukseen. Lämpökameran käytön etuna on myös mittauksista saatava havainnollinen lämpötila-aineisto, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi tilaajan takuun ajan toiminnassa.

Tässä tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella menetelmällä on potentiaalia toimivana laadunvarmistuksen menetelmänä. Kuten tutkimuksessa havaittiin, päällysteen lämpötilalla on merkittäviä vaikutuksia päällysteen ominaisuuksiin. Tuloksia tukevat myös ulkomaiset tutkimukset. Vaikka lämpökameran avulla ei voidakaan erottaa massalajittumaa ja lämpölajittumaa toisistaan, voidaan lämpökameraa hyödyntää tasalaatuisuuden mittaamiseen sekä mahdollisten ongelma-alueiden paikallistamiseen. Lämpökameran käyttöä laadunvarmistuksen menetelmänä heikentää kuitenkin puute tarkastella saumojen laatua. Päällysteen reunoilla lämpötila laskee selvästi muuta päällystettä nopeammin ja esimerkiksi bonuslaskennassa saumat jätettiin huomiotta selvästi alhaisemman lämpötilan takia, sillä sauma-alueet olisivat vääristäneet bonuslaskelmia.

7.2 Jatkotutkimustarve

Tutkimuksessa ei pystytty selvittämään lämpötilan vaikutusta päällysteen kestoikään, sillä kestojen kartoittaminen vaatisi kohteiden pidempiaikaista seuranta. Kuitenkin laboratoriotutkimuksen sekä aikaisempien ulkomaalaisten sekä kotimaisten tutkimusten pohjalta voidaan arvioida päällysteen kestoikää. Muun muassa massalajittuminen sekä korkea tyhjätila altistavat päällysteen ennenaikaisille vaurioille, kuten päällysteen purkaumille.

Tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella olisi tutkimuskohteiden seuranta menetelmän kehittämisen kannalta tärkeää. Kaikki tutkimuskohteet olivat vilkasliikenteisillä väylillä, joilla päällystyskierto on verrattain nopeaa ja yleisin syy päällysteen uusimiselle on nastarengaskuluminen. Seurannan avulla voitaisiin kuitenkin tarkastella mahdol-

listen vaurioiden kuten purkaumien syntyä ja kerätyn tutkimusaineiston avulla selvittää vaurioituneiden kohtien lämpötilatiedot. Seurannan ja lämpötila-aineiston avulla nähdään helposti, syntyvätkö vauriot kuormanvaihtojen tai muuta päällystettyä kylmempien alueiden kohdalle, kuten oletetaan.

Seurannan lisäksi lämpökameratutkimusta suositellaan jatkettavan myös tulevana päällystyskausina. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin ainoastaan kohteita, joissa päällystetyyppinä käytettiin joko SMA 16- tai SMA 22 -massaa. Olisi hyvin tärkeää tutkia myös AB -päällystystyyppin kohteita, sillä asfalttibetoni on Suomessa eniten käytetty päällystetyyppi. Lisäksi tutkimuskohteet tulisi valita siten, että voitaisiin tutkia päällystetyypin lisäksi massan maksimiraekoon vaikutusta lämpötilaeroihin ja mahdollisten kylmien alueiden syntyyn. Maksimiraekoolla on havaittu olevan vaikutusta, kuten tässä tutkimuksessa havaittiin SMA 22 -massan lajittuvan SMA 16 -massaa herkemmin sekä tyhjätilan kasvavan lämpötilan laskiessa SMA 16 -massaa nopeammin. Lämpökameran käyttöä uusien matalalämpöisten asfalttimassojen yhteydessä tulisi myös tutkia, sillä energiaa säästävien massojen käyttö tulee suurella todennäköisyydellä yleistymään lähitulevaisuudessa.

7.3 Suositukset

Lämpökameran käyttöä päällystysurakoissa suositellaan jatkettavan, jotta saataisiin tietoa erilaisten massatyyppien lämpötiloista. Lämpökameraan suositellaan myös liitettäväksi bonusmenetelmä, joka kannustaisi urakoitsijoita laitteiston käyttöön ja omien työtapojensa kehittämiseen.

Tutkimuksen perusteella nykyistä Roadscanners Oy:n kehittämää bonusjärjestelmää tulisi kehittää. Pysähdysten laskeminen tulisi poistaa, sillä pysähdysten välttäminen levittimen nopeutta muuttamalla saattaa heikentää päällysteen laatua ja täten ohjata kohti vääriä työskentelytapoja. Kun levittimen nopeutta muutetaan, tulisi myös levittimen asetuksia säätää. Jos tarvittavia säätöjä ei tehdä, muuttuu joko päällysteen paksuus tai esitiivistysaste, jolloin tuloksena on epähomogeeninen päällyste. Lisäksi levittimen suppilon ajaminen lähes tyhjäksi ei ole suositeltavaa, sillä se lisää lajittumisriskiä.

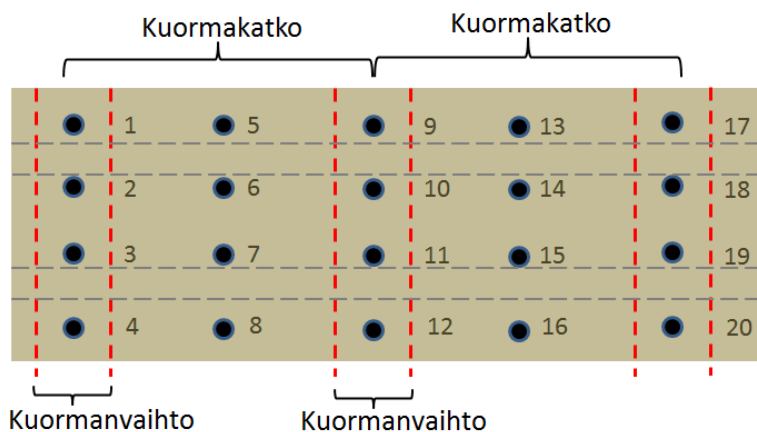
Kylmien alueiden tarkastelua tulisi muuttaa siten, että lämpötilaraja kylmille alueille valittaisiin massatyyppin perusteella. Tässä tutkimuksessa havaittiin SMA 22 -massalla tyhjätilojen nousevan selvästi alle 130 °C lämpötiloissa, kun taas SMA 16 -massoilla tyhjätilojen kasvu ei ollut yhtä voimakasta. Siksi esimerkiksi SMA 22 -massalle kylmien alueiden raja-arvona voitaisiin jatkossa käyttää 130 °C, sillä tällä massalla tiivistävyys heikkenee alhaisissa lämpötiloissa nopeammin kuin SMA 16 -massalla suuremman raekoon vuoksi. Lisäksi kylmien alueiden sallittua osuutta bonusjärjestelmässä tulisi tarkastella, sillä yhdelläkään tutkimukseen osallistuneella kohteella ei bonuksen raja-arvoa saavutettu kylmien alueiden osalta.

Riskialueiden laskeminen on hyvä tapa tarkastella valmiin päällysteen ja pinnan lämpötilan homogeenisuutta. Riskialueiden osuus tulisi laskea lämpötilan juoksevasta keskiarvosta. Ruotsissa riskialueiden laskemiseen käytetään menetelmää, jossa sallitaan 10 % vaihtelu lämpötilan juoksevasta keskiarvosta. Jos lämpötila ylittää sallitun vaihteluvälin, lasketaan ne lämpötila pisteet riskialueiksi. Menetelmä soveltuu myös Suomessa käytetyille massoille. Tutkimuksessa kuitenkin havaittiin tyhjätilan hajonnan pienentyvän korkeilla lämpötiloilla, mikä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi SMA 16 -massalla päällysteen ominaisuudet eivät poikenneet toisistaan merkittävästi 160 -180 °C lämpötila-

loissa. Tämän vuoksi päällysteen homogeenisuutta tulisikin tarkastella asettamalla riskialueiden raja-arvo vain keskilämpötilan alittaville lämpötilapisteille. Riskialueiksi laskettaisiin siis kaikki alle 90 % lämpötilapisteet lämpötilan juoksevasta keskiarvosta, pois lukien päällysteen reuna-alueet sekä häiriöt mittauksissa, kuten tiellä työskentelevät henkilöt tai laitteet. Myös riskialueiden osalta tulisi pohtia bonukseen oikeuttavan raja-arvon alentamista, sillä riskialueiden osalta urakoitsijat saisivat bonusta vain muutamassa tilanteessa.

Lämpökameran käyttö kylmien alueiden ja mahdollisten päällysteen ongelmakohtien paikallistamisessa on havaittu toimivaksi menetelmäksi niin tässä tutkimuksessa kuin useissa tutkimuksissa eri puolilla maailmaa. Tämän vuoksi lämpökameraa voitaisiin hyödyntää myös näytteenotossa. Jos päällysteestä on tarpeellista ottaa poranäytteitä, voitaisiin lämpökameran avulla paikallistaa potentiaaliset riskialueet sekä kohdat, joissa päällysteen oletetaan kestävän sillä asetetut kestoajan ajan.

Tämän tutkimuksen toteutuksessa havaittiin paikkatietoon sekä tierekisteriin sidotun lämpötilamaton olevan käyttökelpoinen väline näytekohtien määrittämisessä. Näytteenottokohdat voidaan valita päällystystyön jälkeen paikkatietoon sidotusta lämpötilamatosta. Jos tahdotaan tarkastella päällysteen yleistä laatua, näytteitä tulisi ottaa sekä kuormanvaihtoista että keskeltä kuormaa. Alla on esitetty esimerkki mahdollisesta näytteenottokaaviosta (kuva 59).



Kuva 59. Ehdotus näytteenottokaaviosta, yhteensä 20 poranäytettä. Arvioidut ajourien kohdat on merkitty katkoviivoin.

Lämpökameralaitteiston kokoa ja asennusta levittimeen tulisi kehittää. Pienempi laitteiston koko helpottaisi asennusta. Myös laitteiston integroitavuutta levittimen tietojärjestelmiin tulisi tutkia ja kehittää. Lisäksi lämpökameran tuottama lämpötilatieto olisi hyödyllinen apuväline jyräkuljettajille. Jos jyräkuljettaja näkisi päällysteeseen muodostuvat kylmemmät alueet, nämä alueet voitaisiin jyrätä ensimmäisenä ja näin estää näiden alueiden liiallinen jäähtyminen. Jyrään voitaisiin asentaa näyttö tai tablettitietokone, jossa näkyisi sama informaatio kuin nykyisessä lämpökameralaitteistoon integroidussa näytössä. Langattoman tiedonsiirron välityksellä kuva voitaisiin saada jyrään vaivattomasti.

Vaikka lämpökameran käytöllä pyritään parantamaan päällysteiden tasalaatuisuutta, on se mahdotonta silloin, kun perusasiat eivät ole kunnossa. Työssä havaittiin kuljetusmatkalla ja kuljetusketjun toiminnalla olevan suurta merkitystä työn onnistumisen kannalta. Oikeanlaisen kuljetuskaluston käytöllä ja huolellisella kuljetusketjun suunnittelulla taa-

taan hyvät lähtökohdat onnistuneelle päällysteelle. Pitkiä kuljetusmatkoja tulisi välttää, jotta lämpötilaerojen muodostumista voitaisiin vähentää. Lisäksi tutkimuksen havaintojen perusteella oikeanlaisella tiivistyksellä voidaan vähentää päällysteen alhaisen lämpötilan aiheuttamien riskien kuten liian korkeiden tyhjätala-arvojen muodostumista. Päällästäminen on monen asian summa, joten koko ketjun toiminta ratkaisee lopputuloksen.

Lähdeluettelo

Andersson, C. 2009. Värmekamera. Metodgruppen för provning och kontroll av vägmateriäl och vägytor. Miniseminarium om vägytemätning för bedomning av asfaltbeläggning. Linköping. 30 s.

Asfalttinormit 2011. Päällystealan neuvottelukunta PANK ry. Edita Oy. 94 + 23 s. ISBN 978-952-99985-1-7.

ASKO - asfalttialan koulutusohjelma 2006. Opetusmateriaali. 204 s. Saatavilla: http://www.infrary.fi/files/2520_ASKOpieni.pdf

ASKO - asfalttialan koulutusohjelma 2013. Opetusmateriaali.

Bomag GmbH 2009. Basic Principles of Asphalt Compaction. 1. Edition. 44 + 9 s. Saatavilla: http://www.bomag.com/world/media/pdf/PRE109016_0901.pdf

Doré, G. & Zubeck, H. 2009. Cold regions pavement engineering. Reston, VA : ACSE Press. 416 s. ISBN 978-0-07-160088-0.

Finlex 2012. Valtioneuvoston asetus asfalttiasemien ympäristönsuojeluvaatimuksista 846/2012. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2012/20120846>

Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH 2013. Asphalt Compaction Info Sheet. 8 s. Saatavilla: www.fliegl-baukom.de

Henault, J. 1999. Development of Guidelines for Reduction of Temperature Differential Damage (TDD) for Hot Mix Asphalt Pavement Projects in Connecticut. Connecticut Department of Transportation. Construction Report. Report No. 2222-1-99-5. 34 + 30 s.

Hyypä, H. 2000. Asfalttipäällysteiden koostumuksen tasalaatuisuus. Teknillinen korkeakoulu. TKK-RTA-R190. 116 + 12 s. ISBN 951-22-5149-3.

Infradex Oy 2013. Yleistietoa. Käyty 18.2.2014. <http://www.infradex.com/index.html>

Laitinen, V. 1990. Lämpökameran soveltuvuus asfalttimassan ja -päällysteen lajittumisen kartoitukseen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma ASTO 1987–1992. Väli raportti TR8. 17 s.

Liikennevirasto, 2010. Päällysteiden pintakarkeuden vaikutukset tien käyttäjiin ja tienpitoon. Helsinki 2010. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2010. 76 + 8 s. ISBN 978-952-255-001-9.

Mahoney, J. ym. 2003. Application of Infrared Thermographic Imaging to Bituminous Concrete Pavements - Final Report. Connecticut Department of Transportation. Report No. 2229-F-03-7. 72 + 92 s.

Meegoda, J. ym. 2002. Correlation of Surface Texture, Segregation, and Measurement of Air Voids. Final Report. New Jersey Department of Transportation. Report No. FHWA-NJ-2002-026. 69 + 27 s.

Onninen, H. 2001. Palvelutasomittaus (PTM) tien rakenteen parantamisen suunnittelussa. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma 1994-2001. Menetelmäkuvaus TPPT 16. 16 + 3 s.

Pellinen, T. 1985. Asfalttimassan epähomogeenisuuden ja lajittumisen vaikutuksesta asfalttipäällysteeseen. Oulun yliopisto. Diplomityö. 118 + 16 s.

Pellinen, T. ym. 2013. Durability of Ring-Road II asphalt pavement. Phase I report on forensic analysis of Ring-Road II pavement distresses. Aalto University publication series 18/2013. 42 + 19 s. ISBN 978-952-60-5265-6 (pdf).

POP ELY, 2013. Tarjouspyyntö: Lisäkirje nro 1. Pohjois-Pohjanmaan ELY -keskus.

Pääkkö, J. & Saarenketo, T. 2011. Päällysteen tasalaatuisuuden laadunvarmistus lämpökameralla. Roadscanners Oy. Loppuraportti. 25 s.

Rand, D. 2012. Measuring pavement Segregation. Ohio Asphalt Paving Conference. 31 s.

Sebesta, S., Wang, F., Scullion, T. & Liu, W. 2006. New Infrared and Radar Systems for Detecting Segregation in Hot-Mix Asphalt Construction. Texas Transportation Institute. Report 0-4577-2. 78 s.

SFS -käsikirja, 2004. Asfalttimassat. Osa 1: Testausmenetelmät 1. SFS, Helsinki. 1. painos. ISBN 952-5420-43-4.

SFS -käsikirja, 2006. Asfalttimassat. Osa 2: Testausmenetelmät 2. SFS, Helsinki. 1. painos. ISBN 952-5420-94-9.

Staten vegvesen 2005. Asphalt 2005 - materialer og utførelse. Håndbok 246. 153 s. ISBN 82-7207-552-0

Stroup-Gardiner, M. & Brown, E. 2000. Segregation in Hot-Mix Asphalt Pavements. National Co-operative highway Research Program. Auburn University. Report No. 441. 91 + 13 s.

Sävinger, B. 2005. Värmekamera. Kalvoesitys.

Tiehallinto, 2005. Palvelutasomittauksen uusien tunnuslukujen käyttöönotto ja hyödyntäminen. Helsinki 2005. Tiehallinnon selvityksiä 50/2005. 57 + 7 s. ISBN 951-803-592-X. TIEH 3200962.

TxDOT 2011. Test Procedure for Thermal Profile of Hot Mix Asphalt. Texas Department of Transportation. Tex-244-F. 7 s.

Väggeret. 2006. Metod för termografisk mätning. VV Publ. Nr 2006:114. 5 s.

Vasama, T. 2006. Päällystystyön tuotannonohjauksen parantaminen lean -ajattelun ja automaation avulla. Teknillinen korkeakoulu. Diplomityö. 86 + 23 s.

Willoughby, K. ym. 2001. Construction-related Asphalt Concrete Pavement Temperature Differentials and the Corresponding Density Differentials. Washington State Transportation Center (TRAC). 58 + 104 s.

Liiteluettelo

- Liite 1. Työmaahavainnot -lomakepohja. 2 sivua.
- Liite 2. Kyselylomakepohja urakoitsijoille. 1 sivu.
- Liite 3. Poranäytteiden ottokohdat. 3 sivua.
- Liite 4. Seulonnan tulokset. 5 sivua.
- Liite 5. Tilavuussuhteet. 3 sivua.

Liite 1. Työmaahavainnot -lomakepohja

Koneasema	
Aseman yleinen toiminta (raportoidut ongelmatilanteet jne.)	
Kiviaineksen ja massan lämpötilat	
Liimaus	
Alustan puhdistus	
Liimauskalusto	
Liiman levitys (tasaisuus, määrä jne.)	
Massan kuljetus	
Kuorman pettäminen	
Kuljetuskalusto (määrä, lavan muoto)	
Kuljetusmatka- ja aika	
Odotusaika työmaalla	
Massan lämpötila	
Massan Levitys	
Levityskalusto ja sen ominaisuudet	
Levittimen toiminta (lajittumien syntyminen, sivulaippojen asen- to jne.)	
Massan lämpötila levittimessä	
Tiivistys	
Kalusto	
Päällysteen lämpötila ennen tiivistystä	

Sää	
Lämpötila, sademäärä, tuulen nopeus jne.	
Muita havaintoja	

Liite 2. Kyselylomakepohja urakoitsijoille

Alle oleviin kysymyksiin voitte kertoa omia kokemuksianne/näkemyksienne lämpökameran käytöstä. Kiitos vastauksista!

1. Laitteisto (käyttö, koko, sijainti, web-palvelu (jos käytössä) jne.)

2. Lämpökameran hyödyntäminen (Miten lämpökameran antamaan informaatiota käytettiin avuksi työnteossa? Seurattiinko lämpötiloja säännöllisesti?)

3. Kokemuksia lämpökameran käytöstä (plussat, miinukset, levitysryhmän kommentit/mielipiteet jne.)

4. Bonusmenetelmä (Oliko bonuslaskentajärjestelmä oikeudenmukainen? Onko bonus mahdollista saavuttaa nykyisillä kriteereillä?)

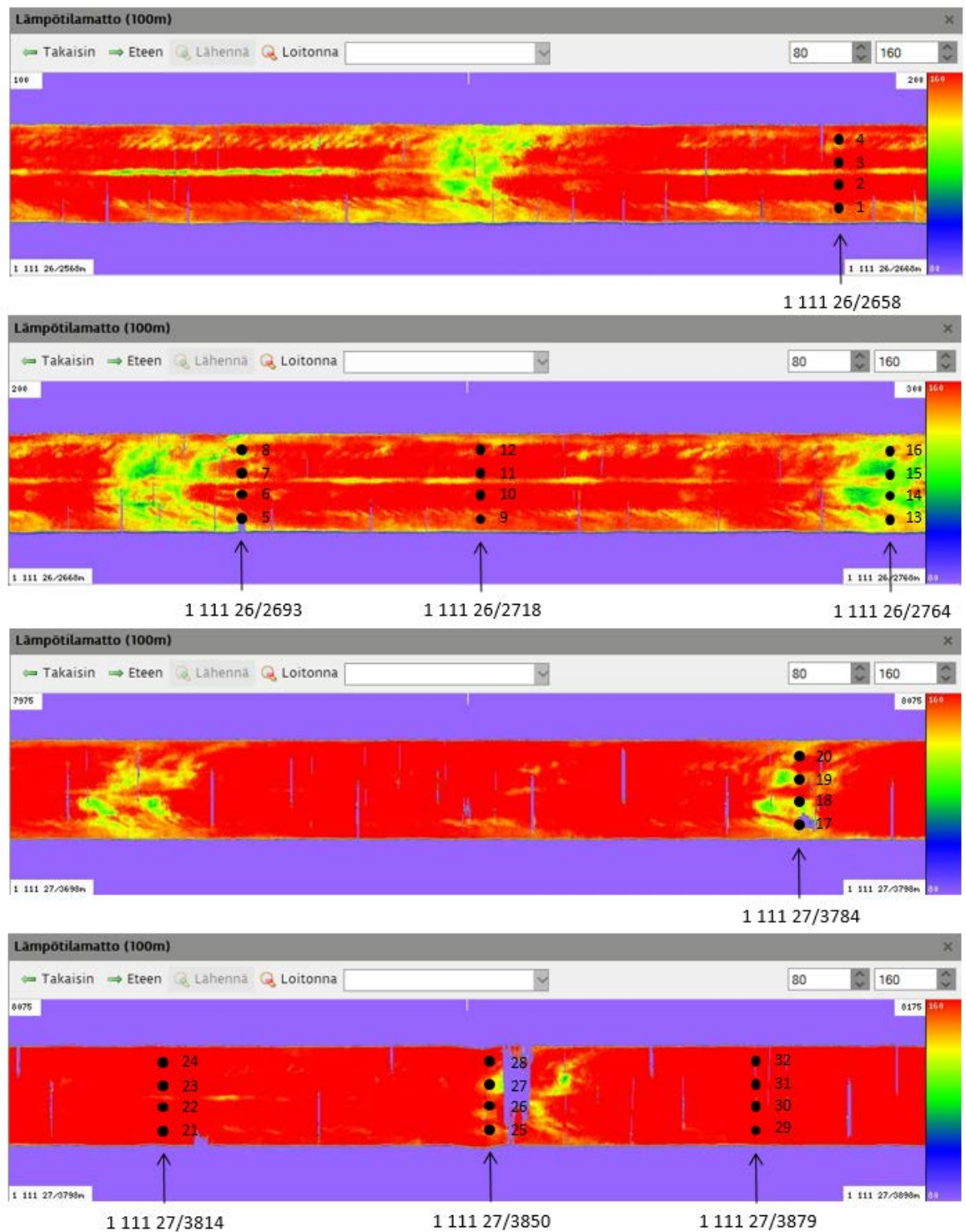
5. Kehittämisehdotuksia/ muutosehdotuksia

6. Oletteko kiinnostuneita lämpökameran käytöstä jatkossa? (tulisiko jotain muuttaa ennen kuin lämpökameran käyttö mahdollisesti yleistyy?)

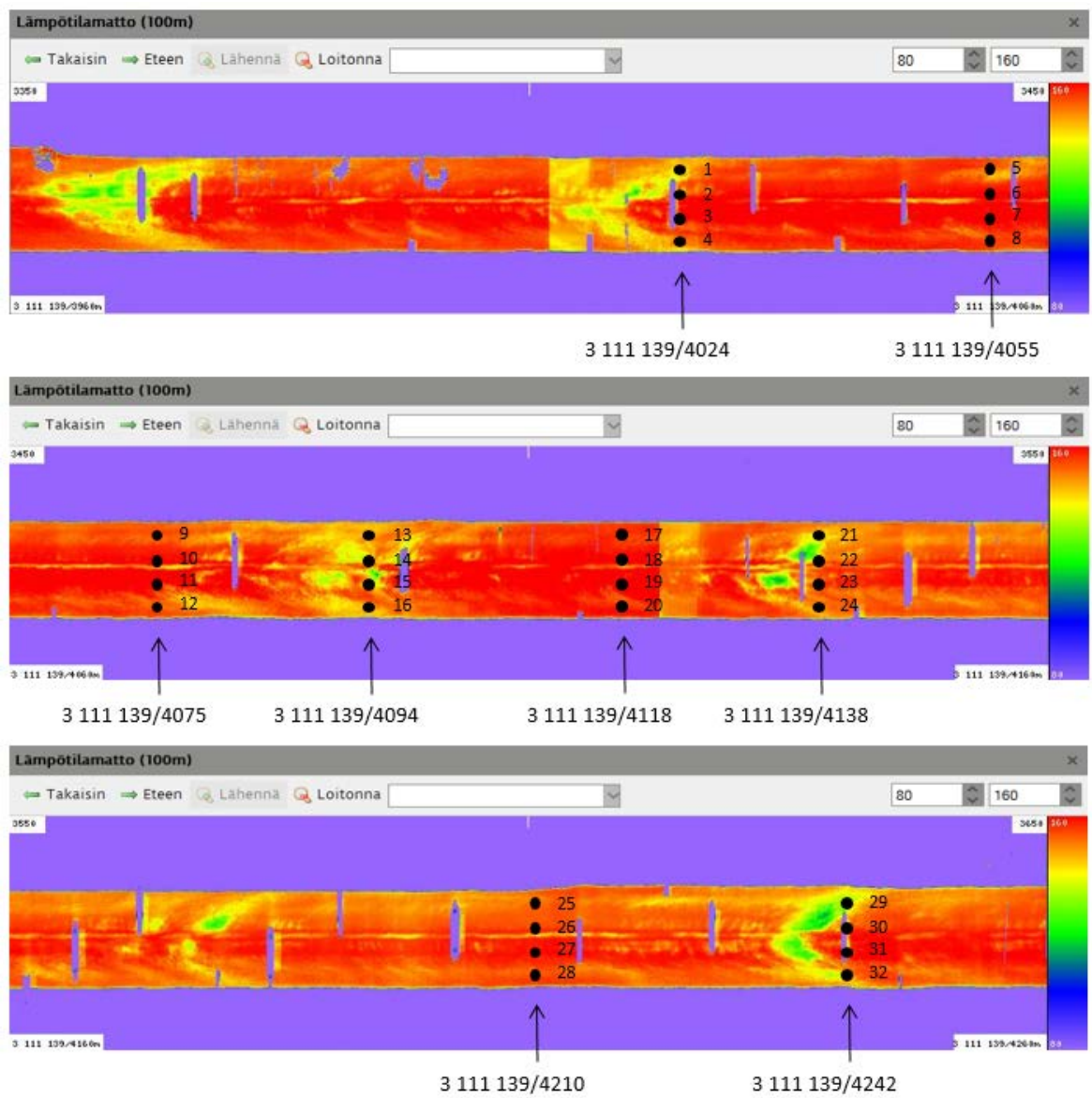
7. Vapaa sana

Liite 3. Poranäytteiden ottokohdat

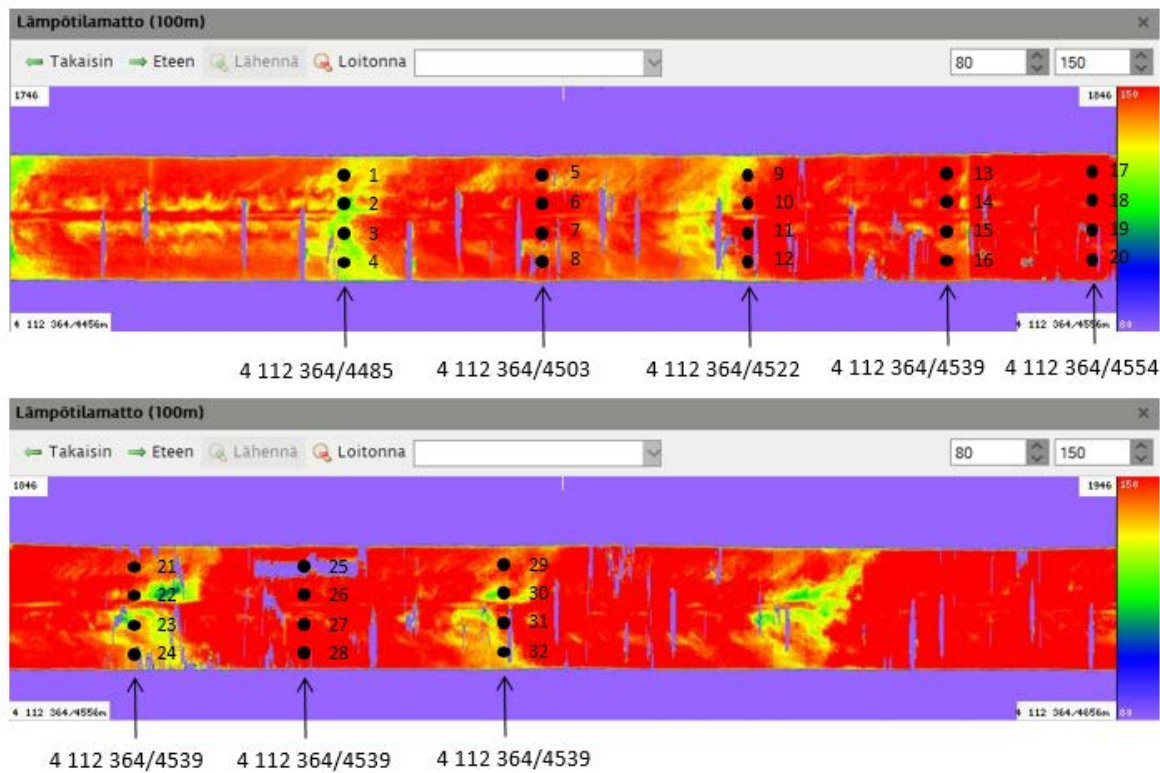
VT1:



VT3:



VT4:



Liite 4. Seulonnan tulokset

VT1:

Seulakoko (mm)	Näytteen läpäisy - %											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	92,9	97,2	96,1	87,2	90,6	92,1	96,5	90,9	92,0	94,8	97,3	92,9
12,5	92,9	97,2	96,1	87,2	90,6	92,1	96,5	90,9	92,0	94,8	97,3	92,9
11,2	62,8	66,4	67,7	63,8	57,8	60,4	65,2	59,7	61,2	61,5	63,2	62,8
10	62,8	66,4	67,7	63,8	57,8	60,4	65,2	59,7	61,2	61,5	63,2	62,8
8	36,3	37,5	35,6	34,6	34,3	31,6	35,2	33,0	34,8	34,2	36,5	35,3
6	36,3	37,5	35,6	34,6	34,3	31,6	35,2	33,0	34,8	34,2	36,5	35,3
5,6	26,8	27,7	27,7	25,4	25,9	24,5	27,8	26,7	27,1	26,5	28,8	27,8
4	23,1	23,2	23,6	21,7	21,8	21,1	23,7	22,5	22,9	22,3	24,9	23,8
2	18,7	18,8	19,1	17,6	17,6	17,1	18,9	18,3	18,7	18,3	20,0	19,2
1	15,8	16,0	16,1	15,3	15,1	14,6	16,2	15,5	15,9	15,6	17,0	16,4
0,5	14,2	14,4	14,3	13,7	13,6	13,2	14,6	13,9	14,3	14,0	15,1	14,6
0,25	13,2	13,3	13,2	12,7	12,7	12,3	13,5	12,8	13,2	12,9	13,9	13,5
0,125	11,5	11,7	11,6	10,9	11,0	10,8	11,8	11,1	11,4	11,2	11,9	11,7
0,075	11,5	11,7	11,6	10,9	11,0	10,8	11,8	11,1	11,4	11,2	11,9	11,7
0,063	9,5	9,6	9,5	9,0	8,9	8,8	9,7	9,0	9,2	8,9	9,5	9,5

VT1:

Seulakoko (mm)	Näytteen läpäisy - %											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	98,9	85,7	95,7	93,9	91,2	96,0	97,1	95,9	92,0	93,2	92,5	94,3
12,5	98,9	85,7	95,7	93,9	91,2	96,0	97,1	95,9	92,0	93,2	92,5	94,3
11,2	67,3	58,4	65,2	57,6	59,7	67,4	63,7	65,3	63,8	67,0	65,6	64,5
10	67,3	58,4	65,2	57,6	59,7	67,4	63,7	65,3	63,8	67,0	65,6	64,5
8	35,4	34,2	34,8	32,5	35,9	41,5	42,9	38,3	39,0	38,8	40,1	38,4
6	35,4	34,2	34,8	32,5	35,9	41,5	42,9	38,3	39,0	38,8	40,1	38,4
5,6	27,8	25,7	26,7	25,0	28,4	30,2	33,3	28,9	28,9	28,8	30,5	29,1
4	23,7	21,3	22,9	21,2	23,7	25,2	28,0	23,9	23,8	24,2	25,2	24,4
2	19,0	17,5	18,5	17,0	18,7	19,7	21,5	19,1	18,6	19,0	19,3	19,1
1	16,0	14,9	15,7	14,3	15,5	16,4	17,6	16,1	15,5	16,0	16,1	15,9
0,5	14,5	13,3	14,1	12,9	13,8	14,6	15,1	14,3	13,8	14,2	14,2	14,2
0,25	13,5	12,4	13,1	12,1	12,9	13,5	13,6	13,2	13,0	13,2	13,2	13,3
0,125	12,2	11,3	11,8	11,2	11,9	12,3	12,1	12,1	12,1	12,1	12,3	12,3
0,075	12,2	11,3	11,8	11,2	11,9	12,3	12,1	12,1	12,1	12,1	12,3	12,3
0,063	10,6	9,8	10,1	10,0	10,8	10,7	10,4	10,5	11,0	10,6	11,8	11,5

VT1:

Seulakoko (mm)	Näytteen läpäisy - %							
	25	26	27	28	29	30	31	32
25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	96,8	98,7	97,5	95,9	97,0	99,0	96,3	96,0
12,5	96,8	98,7	97,5	95,9	97,0	99,0	96,3	96,0
11,2	67,2	70,3	65,7	63,4	63,5	64,1	67,5	67,6
10	67,2	70,3	65,7	63,4	63,5	64,1	67,5	67,6
8	40,1	43,0	39,5	37,8	39,3	42,6	41,8	40,9
6	40,1	43,0	39,5	37,8	39,3	42,6	41,8	40,9
5,6	28,0	31,4	28,2	27,0	28,5	31,8	30,8	28,8
4	23,2	26,3	24,0	22,7	23,9	26,0	25,3	24,1
2	18,2	20,5	19,0	18,1	18,9	20,2	19,8	18,7
1	15,1	17,1	15,8	15,2	15,8	16,8	16,5	15,7
0,5	13,5	15,2	14,1	13,6	14,1	15,0	14,7	14,0
0,25	12,6	14,2	13,2	12,7	13,2	14,0	13,8	13,1
0,125	11,8	13,3	12,3	11,9	12,4	13,0	12,9	12,2
0,075	11,8	13,3	12,3	11,9	12,4	13,0	12,9	12,2
0,063	11,3	12,1	11,8	11,3	11,7	11,9	12,3	11,5

VT3:

Seulakoko (mm)	Näytteen läpäisy - %											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100,0	98,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	92,5	91,9	91,1	91,6	95,0	97,0	95,1	94,3	97,6	92,8	90,7	94,3
12,5	92,5	91,9	91,1	91,6	95,0	97,0	95,1	94,3	97,6	92,8	90,7	94,3
11,2	59,1	59,7	63,1	62,9	57,9	63,0	61,3	62,7	65,1	62,6	59,9	61,3
10	59,1	59,7	63,1	62,9	57,9	63,0	61,3	62,7	65,1	62,6	59,9	61,3
8	34,2	34,7	34,0	36,5	32,0	35,4	35,8	35,2	34,2	34,4	34,2	33,5
6	34,2	34,7	34,0	36,5	32,0	35,4	35,8	35,2	34,2	34,4	34,2	33,5
5,6	27,8	28,2	28,8	30,5	27,3	29,7	30,2	29,5	28,0	28,4	29,3	28,5
4	24,4	24,7	25,6	27,2	23,9	26,6	26,6	25,8	24,5	25,0	26,6	25,8
2	20,6	20,9	21,2	22,5	20,2	21,9	22,4	21,6	20,6	20,8	22,2	22,2
1	17,5	17,8	18,0	19,1	17,3	18,7	19,1	18,4	17,7	17,7	18,9	19,0
0,5	15,5	15,6	15,8	16,8	15,1	16,4	16,6	16,0	15,4	15,5	16,5	16,6
0,25	14,3	14,3	14,5	15,4	13,6	14,8	14,9	14,4	14,0	14,0	15,0	15,1
0,125	13,2	13,1	13,4	14,1	12,4	13,4	13,6	12,8	12,8	12,7	13,7	13,8
0,075	13,2	13,1	13,4	14,1	12,4	13,4	13,6	12,8	12,8	12,7	13,7	13,8
0,063	12,7	12,4	12,8	12,6	11,7	12,6	13,0	11,4	11,6	11,4	12,7	12,4

VT3:

Seulakoko (mm)	Näytteen läpäisy - %											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	93,5	95,1	92,0	97,0	94,4	97,2	89,5	91,1	97,5	94,3	91,6	91,4
12,5	93,5	95,1	92,0	97,0	94,4	97,2	89,5	91,1	97,5	94,3	91,6	91,4
11,2	66,0	62,9	59,4	66,6	64,6	62,1	56,0	61,7	65,4	66,9	57,8	61,5
10	66,0	62,9	59,4	66,6	64,6	62,1	56,0	61,7	65,4	66,9	57,8	61,5
8	35,6	35,7	37,4	34,2	33,7	36,0	31,0	32,9	36,3	36,3	35,8	34,0
6	35,6	35,7	37,4	34,2	33,7	36,0	31,0	32,9	36,3	36,3	35,8	34,0
5,6	28,3	28,7	30,1	28,1	28,2	29,8	26,4	27,0	28,9	28,6	28,4	27,5
4	24,0	24,9	26,0	24,3	25,3	25,6	23,8	23,8	25,8	25,3	25,7	24,3
2	19,8	20,5	21,3	20,3	21,1	21,2	20,1	20,2	21,5	21,2	21,4	20,8
1	16,7	17,2	17,9	17,2	17,9	18,0	17,0	17,3	18,0	17,9	18,1	17,7
0,5	14,5	15,1	15,6	14,9	15,6	15,7	14,9	15,2	15,6	15,7	15,8	15,5
0,25	13,2	13,7	14,2	13,5	14,2	14,3	13,5	13,8	14,1	14,2	14,4	14,1
0,125	11,9	12,5	13,0	12,3	12,9	13,0	12,3	12,5	12,8	12,9	13,1	12,8
0,075	11,9	12,5	13,0	12,3	12,9	13,0	12,3	12,5	12,8	12,9	13,1	12,8
0,063	10,8	11,3	12,1	11,1	11,9	11,9	11,2	11,3	11,6	11,9	12,0	11,8

VT3:

Seulakoko (mm)	Näytteen läpäisy - %							
	25	26	27	28	29	30	31	32
25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	94,2	91,6	91,8	97,9	94,3	91,2	95,7	97,7
12,5	94,2	91,6	91,8	97,9	94,3	91,2	95,7	97,7
11,2	69,9	65,0	61,8	63,6	62,2	64,3	66,9	60,7
10	69,9	65,0	61,8	63,6	62,2	64,3	66,9	60,7
8	38,9	37,4	35,1	38,5	37,4	38,5	38,3	35,5
6	38,9	37,4	35,1	38,5	37,4	38,5	38,3	35,5
5,6	31,0	31,0	29,2	31,1	30,0	30,8	31,4	28,7
4	26,6	26,8	25,8	26,7	26,1	26,7	27,9	25,2
2	21,7	21,9	21,3	21,7	21,2	21,9	23,0	21,1
1	18,3	18,3	17,8	18,3	17,7	18,4	19,3	18,0
0,5	16,1	16,0	15,5	15,9	15,5	16,1	16,7	15,7
0,25	14,7	14,5	14,1	14,5	14,0	14,6	15,1	14,2
0,125	13,5	13,0	12,7	13,2	12,6	13,2	13,5	12,9
0,075	13,5	13,0	12,7	13,2	12,6	13,2	13,5	12,9
0,063	12,6	11,6	11,7	12,2	11,5	12,0	12,2	11,8

VT4:

Seulakoko (mm)	Näytteen läpäisy - %											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	92,7	93,1	98,1	97,1	97,6	92,0	98,5	94,9	93,4	98,5	98,2	94,0
16	79,3	75,1	82,2	83,1	77,1	79,3	84,5	80,1	74,9	81,2	75,6	71,9
12,5	79,3	75,1	82,2	83,1	77,1	79,3	84,5	80,1	74,9	81,2	75,6	71,9
11,2	44,4	46,0	50,2	43,7	45,4	51,8	52,7	49,8	49,1	50,2	44,4	44,1
10	44,4	46,0	50,2	43,7	45,4	51,8	52,7	49,8	49,1	50,2	44,4	44,1
8	32,1	37,7	38,2	34,7	36,0	37,6	41,6	38,7	38,8	38,7	36,3	34,5
6	32,1	37,7	38,2	34,7	36,0	37,6	41,6	38,7	38,8	38,7	36,3	34,5
5,6	27,4	32,2	32,9	29,6	30,3	30,6	34,6	31,4	33,1	32,9	31,2	29,1
4	24,4	27,4	28,2	26,0	26,5	26,6	29,6	26,9	29,4	28,6	26,8	25,6
2	20,8	22,2	22,8	21,4	21,9	21,7	24,0	21,9	25,2	23,0	22,2	21,0
1	18,2	19,2	19,5	18,6	19,0	18,8	20,4	18,9	22,4	19,8	19,1	18,1
0,5	16,3	17,1	17,5	16,6	17,1	16,8	18,0	16,9	20,1	17,7	17,0	16,2
0,25	14,9	15,8	16,1	15,3	15,6	15,5	16,4	15,5	17,9	16,2	15,6	14,8
0,125	13,4	14,3	14,5	13,8	14,2	14,1	14,8	14,1	15,4	14,7	14,1	13,5
0,075	13,4	14,3	14,5	13,8	14,2	14,1	14,8	14,1	15,4	14,7	14,1	13,5
0,063	11,3	12,0	12,0	11,5	11,9	11,9	12,3	11,9	12,8	12,5	11,8	11,4

VT4:

Seulakoko (mm)	Näytteen läpäisy - %											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	95,9	95,2	95,0	89,9	94,9	96,8	95,5	98,6	96,2	94,4	98,1	90,4
16	79,6	79,8	80,7	71,4	78,6	77,5	73,2	85,5	74,8	72,7	85,6	66,9
12,5	79,6	79,8	80,7	71,4	78,6	77,5	73,2	85,5	74,8	72,7	85,6	66,9
11,2	47,4	47,8	49,7	44,8	53,1	49,3	50,4	55,2	45,8	50,2	56,0	43,7
10	47,4	47,8	49,7	44,8	53,1	49,3	50,4	55,2	45,8	50,2	56,0	43,7
8	38,6	37,2	36,4	33,5	39,7	39,1	38,4	41,7	35,6	38,7	39,1	33,9
6	38,6	37,2	36,4	33,5	39,7	39,1	38,4	41,7	35,6	38,7	39,1	33,9
5,6	32,3	31,7	29,7	29,0	34,1	32,4	32,8	34,9	30,9	32,3	33,1	28,0
4	28,3	27,2	25,0	25,2	31,0	28,3	28,3	30,0	27,6	28,0	28,5	24,5
2	23,5	22,0	19,2	20,5	26,7	23,2	23,0	24,0	22,9	22,6	23,1	20,0
1	20,5	19,0	16,0	17,8	24,2	19,7	19,8	20,6	20,0	19,3	19,8	17,2
0,5	18,3	17,1	13,8	15,9	21,7	17,6	17,5	18,4	17,7	17,2	17,6	15,4
0,25	16,6	15,7	12,3	14,6	18,7	16,2	16,0	16,9	16,0	15,8	16,1	14,1
0,125	14,9	14,3	10,7	13,3	15,8	14,7	14,5	15,4	14,3	14,4	14,5	12,8
0,075	14,9	14,3	10,7	13,3	15,8	14,7	14,5	15,4	14,3	14,4	14,5	12,8
0,063	12,4	12,1	8,3	11,2	13,3	12,3	12,3	13,0	12,0	12,1	12,3	10,8

VT4:

Seulakoko (mm)	Näytteen läpäisy - %							
	25	26	27	28	29	30	31	32
25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	93,4	100,0	90,4	97,1	100,0	97,9	93,8	95,7
16	84,5	84,7	71,6	83,0	79,6	78,5	81,9	75,0
12,5	84,5	84,7	71,6	83,0	79,6	78,5	81,9	75,0
11,2	50,9	50,2	46,4	48,3	46,8	46,4	47,7	47,0
10	50,9	50,2	46,4	48,3	46,8	46,4	47,7	47,0
8	38,5	38,1	34,7	33,6	34,3	34,6	35,4	33,8
6	38,5	38,1	34,7	33,6	34,3	34,6	35,4	33,8
5,6	32,9	32,9	29,1	28,5	28,9	28,0	30,5	27,9
4	28,1	27,8	24,7	24,8	25,7	24,9	26,4	24,5
2	22,6	22,3	19,8	20,7	21,4	20,9	21,8	20,3
1	19,4	19,3	16,9	17,6	18,5	18,2	18,9	17,5
0,5	17,3	17,3	14,9	15,8	16,5	16,3	16,8	15,6
0,25	15,8	15,9	13,5	14,6	15,1	15,0	15,4	14,5
0,125	14,3	14,5	12,3	13,6	13,6	13,7	13,9	13,4
0,075	14,3	14,5	12,3	13,6	13,6	13,7	13,9	13,4
0,063	12,1	12,3	10,2	12,6	11,5	11,7	11,7	12,7

Liite 5. Tilavuussuhteet

V_a = tyhjätila; **VMA** = kiviaineksen tyhjätila, tilavuus-%; **VFB** = bitumin täyttöaste, tilavuus-%; **V_{b_eff}** = efektiivinen sideainepitoisuus, tilavuus-%; **ρ_{mm}** = massan maksimitiheys; **ρ_{mb}** = päällysteen tiheys; **ρ_{sb}** = kiviaineksen kiintotiheys; **ρ_{se}** = kiviaineksen efektiivinen tiheys; **P_b** = sideainepitoisuus, massa-%; **P_a** = absorboitunut sideainepitoisuus, massa-%; **P_{eff}** = efektiivinen sideainepitoisuus, massa-%.

VT1											
Näyte	V_a %	VMA %	VFB %	V_{b_eff} %	ρ_{mm} Mg/m³	ρ_{mb} Mg/m³	ρ_{sb} Mg/m³	ρ_{se} Mg/m³	P_b %	P_a %	P_{eff} %
1	1,7	15,66	89,28	13,98	2,437	2,396	2,670	2,670	6,0	0,00	6,01
2	1,5	15,42	90,18	13,91	2,437	2,400	2,670	2,667	5,9	-0,02	5,94
3	1,3	15,63	91,54	14,31	2,424	2,392	2,670	2,645	5,8	-0,15	5,96
4	3,5	15,96	78,10	12,47	2,458	2,372	2,669	2,672	5,4	0,01	5,43
5	2,2	15,68	86,19	13,51	2,444	2,391	2,669	2,673	5,9	0,02	5,85
6	2,8	15,60	82,32	12,84	2,452	2,385	2,669	2,669	5,5	0,00	5,54
7	3,2	17,10	81,11	13,87	2,435	2,356	2,670	2,669	6,0	-0,01	6,05
8	2,7	15,19	81,95	12,44	2,444	2,377	2,670	2,623	4,7	-0,22	4,95
9	2,1	15,92	86,98	13,84	2,438	2,387	2,670	2,670	6,0	0,00	5,97
10	1,4	14,86	90,86	13,50	2,446	2,413	2,669	2,673	5,8	0,02	5,79
11	1,6	16,16	90,34	14,60	2,427	2,389	2,670	2,671	6,3	0,01	6,30
12	2,4	16,13	84,99	13,71	2,438	2,379	2,670	2,665	5,9	-0,03	5,90
13	1,5	15,88	90,46	14,36	2,430	2,393	2,670	2,667	6,1	-0,02	6,15
14	1,0	14,29	93,14	13,31	2,449	2,425	2,670	2,670	5,7	0,00	5,65
15	1,6	15,56	89,53	13,93	2,437	2,397	2,670	2,668	6,0	-0,01	5,97
16	3,7	16,66	78,09	13,01	2,446	2,357	2,670	2,664	5,6	-0,03	5,64
17	2,7	16,37	83,23	13,62	2,442	2,375	2,670	2,675	6,0	0,03	5,94
18	1,6	15,70	89,82	14,10	2,440	2,401	2,671	2,685	6,2	0,09	6,15
19	0,9	14,27	93,78	13,38	2,452	2,430	2,671	2,678	5,8	0,04	5,73
20	2,4	16,20	84,96	13,76	2,442	2,382	2,671	2,678	6,0	0,04	6,01
21	1,4	15,33	90,61	13,89	2,440	2,405	2,671	2,673	6,0	0,01	5,97
22	1,3	15,18	91,69	13,92	2,441	2,411	2,671	2,677	6,0	0,04	6,00
23	1,3	15,08	91,33	13,77	2,443	2,411	2,671	2,674	5,9	0,02	5,91
24	2,0	16,07	87,51	14,06	2,441	2,392	2,671	2,688	6,3	0,11	6,18
25	1,9	15,30	87,50	13,39	2,451	2,404	2,671	2,685	5,9	0,08	5,85
26	0,0	15,59	100,00	15,59	2,414	2,432	2,671	2,667	6,6	-0,03	6,62
27	0,8	14,83	94,90	14,07	2,443	2,425	2,671	2,686	6,2	0,09	6,09
28	1,5	15,28	90,24	13,79	2,442	2,406	2,670	2,674	6,0	0,02	5,93
29	0,8	15,23	94,93	14,45	2,431	2,413	2,671	2,670	6,2	-0,01	6,16
30	0,0	15,21	100,00	15,21	2,423	2,452	2,671	2,674	6,5	0,02	6,49
31	0,0	14,88	100,00	14,88	2,428	2,430	2,671	2,674	6,3	0,01	6,33
32	2,4	16,21	85,49	13,86	2,440	2,383	2,671	2,677	6,1	0,04	6,04
KA	1,7	15,58	89,10	13,85	2,44	2,40	2,67	2,67	5,96	0,01	5,95

V_a = tyhjättila; **VMA** = kiviaineksen tyhjättila, tilavuus-%; **VFB** = bitumin täyttöaste, tilavuus-%; **V_{b,eff}** = efektiivinen sideainepitoisuus, tilavuus-%; **ρ_{mm}** = massan maksimitiheys; **ρ_{mb}** = päällysteen tiheys; **ρ_{sb}** = kiviaineksen kiintotiheys; **ρ_{se}** = kiviaineksen efektiivinen tiheys; **P_b** = sideainepitoisuus, massa-%; **P_a** = absorboitunut sideainepitoisuus, massa-%; **P_{eff}** = efektiivinen sideainepitoisuus, massa-%.

VT3											
Näyte	V_a %	VMA %	VFB %	V_{b,eff} %	ρ_{mm} Mg/m³	ρ_{mb} Mg/m³	ρ_{sb} Mg/m³	ρ_{se} Mg/m³	P_b %	P_a %	P_{eff} %
1	5,6	17,61	68,05	11,99	2,548	2,404	2,768	2,770	5,2	0,01	5,15
2	3,7	16,49	77,76	12,83	2,535	2,442	2,768	2,764	5,4	-0,02	5,38
3	3,0	16,07	81,37	13,08	2,534	2,458	2,769	2,768	5,5	0,00	5,47
4	2,1	15,88	87,08	13,83	2,522	2,470	2,772	2,760	5,6	-0,06	5,68
5	3,7	15,99	76,69	12,26	2,547	2,452	2,767	2,769	5,2	0,01	5,16
6	2,7	16,03	83,40	13,37	2,531	2,464	2,770	2,769	5,6	0,00	5,58
7	6,9	15,66	56,04	8,78	2,664	2,480	2,770	2,953	5,8	1,00	4,88
8	4,4	18,08	75,83	13,71	2,520	2,410	2,772	2,765	5,8	-0,04	5,81
9	4,9	17,24	71,36	12,30	2,538	2,413	2,769	2,751	5,0	-0,09	5,11
10	2,7	16,16	83,21	13,44	2,530	2,461	2,769	2,773	5,7	0,02	5,65
11	2,0	15,59	86,95	13,55	2,527	2,475	2,769	2,764	5,6	-0,03	5,61
12	4,3	17,25	74,82	12,91	2,533	2,423	2,765	2,772	5,6	0,04	5,54
13	5,5	18,26	69,99	12,78	2,538	2,399	2,778	2,766	5,3	-0,06	5,40
14	4,3	16,42	73,53	12,07	2,543	2,432	2,752	2,776	5,4	0,13	5,30
15	1,2	15,76	92,43	14,57	2,513	2,483	2,771	2,768	6,0	-0,02	6,02
16	5,1	18,16	71,95	13,06	2,532	2,403	2,769	2,775	5,7	0,03	5,64
17	3,5	16,54	79,11	13,09	2,531	2,444	2,768	2,763	5,4	-0,03	5,48
18	2,7	15,98	82,91	13,25	2,532	2,462	2,771	2,764	5,5	-0,04	5,49
19	4,2	16,90	74,94	12,67	2,538	2,430	2,767	2,769	5,4	0,01	5,39
20	6,4	19,14	66,42	12,71	2,531	2,369	2,768	2,767	5,5	0,00	5,52
21	2,4	16,45	85,45	14,05	2,522	2,462	2,770	2,778	6,0	0,05	5,94
22	3,0	16,20	81,40	13,19	2,531	2,455	2,770	2,764	5,5	-0,03	5,49
23	1,4	15,38	90,74	13,95	2,520	2,484	2,768	2,762	5,7	-0,04	5,74
24	6,1	18,01	66,33	11,95	2,544	2,390	2,769	2,757	5,0	-0,06	5,06
25	3,6	17,30	79,20	13,71	2,520	2,429	2,772	2,759	5,6	-0,07	5,72
26	3,2	17,20	81,22	13,97	2,519	2,437	2,773	2,766	5,8	-0,04	5,86
27	1,6	16,68	90,49	15,09	2,509	2,469	2,770	2,789	6,5	0,12	6,42
28	4,3	18,10	76,20	13,79	2,521	2,412	2,772	2,772	5,9	0,00	5,89
29	4,8	17,29	72,32	12,51	2,540	2,418	2,771	2,762	5,2	-0,05	5,25
30	4,6	17,24	73,33	12,64	2,541	2,424	2,772	2,770	5,3	-0,01	5,36
31	1,2	16,19	92,42	14,96	2,505	2,475	2,772	2,763	6,1	-0,05	6,17
32	6,4	19,32	66,75	12,89	2,531	2,368	2,770	2,772	5,6	0,01	5,63
KA	3,8	16,89	77,80	13,09	2,534	2,437	2,769	2,773	5,58	0,02	5,56

V_a = tyhjätila; **VMA** = kiviaineksen tyhjätila, tilavuus-%; **VFB** = bitumin täyttöaste, tilavuus-%; **V_{b,eff}** = efektiivinen sideainepitoisuus, tilavuus-%; **ρ_{mm}** = massan maksimitiheys; **ρ_{mb}** = päällysteen tiheys; **ρ_{sb}** = kiviaineksen kiintotiheys; **ρ_{se}** = kiviaineksen efektiivinen tiheys; **P_b** = sideainepitoisuus, massa-%; **P_a** = absorboitunut sideainepitoisuus, massa-%; **P_{eff}** = efektiivinen sideainepitoisuus, massa-%.

VT4												
Näyte	V_a %	VMA %	VFB %	V_{b,eff} %	ρ_{mm} Mg/m³	ρ_{mb} Mg/m³	ρ_{sb} Mg/m³	ρ_{se} Mg/m³	P_b %	P_a %	P_{eff} %	
1	5,7	17,00	66,60	11,32	2,743	2,587	2,959	3,010	5,1	0,25	4,82	
2	7,5	19,18	60,65	11,63	2,735	2,529	2,963	3,015	5,3	0,27	5,05	
3	7,1	19,20	63,18	12,13	2,728	2,535	2,968	3,010	5,4	0,22	5,17	
4	6,3	17,06	62,79	10,71	2,764	2,589	2,962	3,039	5,1	0,38	4,73	
5	5,4	17,38	68,88	11,97	2,724	2,576	2,961	2,985	5,0	0,12	4,94	
6	5,5	17,48	68,62	11,99	2,727	2,577	2,962	2,994	5,1	0,16	4,99	
7	4,1	17,07	75,87	12,95	2,727	2,615	2,966	3,043	5,9	0,44	5,51	
8	6,4	18,17	64,70	11,76	2,731	2,556	2,962	3,001	5,2	0,20	4,98	
9	2,9	16,79	82,65	13,88	2,696	2,617	2,962	2,996	5,8	0,19	5,65	
10	4,6	16,66	72,56	12,09	2,738	2,613	2,963	3,030	5,5	0,36	5,15	
11	6,8	18,14	62,70	11,37	2,752	2,566	2,963	3,049	5,5	0,46	5,06	
12	8,0	18,81	57,64	10,84	2,754	2,535	2,961	3,029	5,1	0,34	4,82	
13	5,1	18,12	71,84	13,01	2,706	2,568	2,962	2,991	5,5	0,16	5,39	
14	1,2	13,10	90,82	11,90	2,754	2,720	2,963	3,042	5,4	0,41	4,97	
15	1,0	12,98	92,34	11,99	2,731	2,704	2,972	2,954	4,4	-0,08	4,44	
16	1,5	13,24	88,72	11,75	2,749	2,708	2,962	3,020	5,1	0,29	4,82	
17	0,0	15,08	100,00	15,08	2,682	2,694	2,962	3,001	6,2	0,24	5,99	
18	0,1	12,93	99,10	12,82	2,745	2,742	2,975	3,041	5,5	0,36	5,19	
19	0,9	13,73	93,61	12,85	2,727	2,703	2,964	3,012	5,4	0,26	5,18	
20	1,8	15,62	88,18	13,77	2,711	2,661	2,964	3,028	6,0	0,38	5,67	
21	3,3	15,15	78,46	11,89	2,748	2,659	2,962	3,042	5,5	0,43	5,07	
22	3,6	15,03	76,13	11,44	2,747	2,648	2,949	3,036	5,4	0,46	4,97	
23	0,6	12,87	95,48	12,29	2,748	2,732	2,964	3,043	5,5	0,42	5,09	
24	2,7	13,65	80,04	10,93	2,760	2,685	2,962	3,012	4,7	0,23	4,52	
25	1,0	13,47	92,74	12,50	2,741	2,714	2,964	3,035	5,5	0,38	5,15	
26	0,0	12,44	100,00	12,44	2,741	2,782	2,964	3,025	5,3	0,32	5,04	
27	2,7	14,61	81,36	11,88	2,781	2,705	2,965	3,148	6,4	1,11	5,38	
28	2,0	13,30	85,21	11,33	2,759	2,704	2,958	3,037	5,2	0,40	4,80	
29	5,7	15,60	63,23	9,86	2,821	2,660	2,961	3,175	6,0	1,20	4,89	
30	6,8	14,78	53,83	7,96	2,851	2,656	2,959	3,148	5,1	0,90	4,21	
31	3,1	14,34	78,28	11,22	2,768	2,682	2,962	3,064	5,4	0,54	4,90	
32	2,4	12,87	81,54	10,49	2,779	2,713	2,956	3,055	5,1	0,48	4,59	
KA	3,62	15,49	78,06	11,88	2,75	2,65	2,963	3,03	5,40	0,38	5,04	